

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANGELO ZERBETTO NETO**

**ANÁLISE DO IMPACTO DA  
COMUNICAÇÃO EM REDES  
FOUNDATION FIELDBUS NO  
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE  
CONTROLE**

Porto Alegre  
2007

**ANGELO ZERBETTO NETO**

**ANÁLISE DO IMPACTO DA  
COMUNICAÇÃO EM REDES  
FOUNDATION FIELDBUS NO  
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE  
CONTROLE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr.

Porto Alegre  
2007

**ANGELO ZERBETTO NETO**

**ANÁLISE DO IMPACTO DA  
COMUNICAÇÃO EM REDES  
FOUNDATION FIELDBUS NO  
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE  
CONTROLE**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira ,  
Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Lúcia Regina Horta Franco , UNIFEI  
Doutora pela Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

Prof. Dr. Walter Fetter Lages , UFRGS  
Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos, Brasil

Prof. Dr. João Cesar Netto , UFRGS  
Doutor pela Universidade Católica de Louvain – Louvain, Bélgica

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques , UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcelo Lubaszewski

Porto Alegre, março de 2007.

## **DEDICATÓRIA**

Às vezes a jornada que nos é reservada exige que renunciemos a muitas coisas simples das quais só sentimos falta quando somos privados delas. Assim foi com os "bate-papos" com meu pai até tarde da noite, com o café quente, boa comida e carinho de minha mãe, o sorriso e afeto de minha avó, as conversas com minha tia Maura e meu tio Darcy, enfim, toda convivência com a minha família que amo e que sempre esteve ao meu lado como porto seguro e com os braços abertos para me acolher. A todas estas pessoas que fazem e sempre farão parte da minha vida, eu dedico este trabalho.

**Angelo Zerbetto Neto**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria, em primeiro lugar, de agradecer a Deus por ter me dado a força e a paz de espírito necessárias para concluir este desafio. Meus agradecimentos também a Pedro Tofolli e sua esposa Vera Closs, que me receberam como a um filho em Porto Alegre e foram e são referências de amizade e generosidade, aos meus amigos do LASCAR, ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira e meu co-orientador Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr. pela paciência, disposição e comprometimento com a evolução deste trabalho.

**Angelo Zerbetto Neto**

## RESUMO

Com o desenvolvimento e disseminação dos protocolos de rede, o surgimento dos chips de ASIC e queda dos preços do silício (estes dois últimos fatores possibilitando com que os sensores e atuadores pudessem ser equipados com interfaces de rede e com isso se tornarem nós independentes em uma rede de controle em tempo real), viabilizaram o desenvolvimento dos sistemas de controle em rede que hoje em dia vêm sendo amplamente utilizados. Juntamente com o aparecimento dos sistemas de controle em rede, novos problemas surgiram sendo um deles o atraso de transporte nas comunicações dos sensores/atuadores/controladores e as conseqüências relacionadas a este fator. Este trabalho tem por objetivo contextualizar sistemas de controle em rede no que concerne novas metodologias de sistemas de controle, escalonamento e apresentar as influências causadas pela comunicação em redes Foundation Fieldbus no desempenho de sistemas de controle.

**Palavras-chave:** Sistemas de controle em rede, foundation fieldbus, atraso de transporte, escalonamento.

## **ABSTRACT**

The development and dissemination of network protocols, the arising of ASIC chip and price drops in silicon (these two last factors allow sensors and actuators be equipped with network interfaces and thus become independent nodes in a real-time control network), make the development of Networked Control Systems possible, which became widely used. New issues - such as an increase in the communication delay among distributed sensors, controller, and actuators have to be handled by designers when developing networked control systems in order to ensure that stability and other usual control performance requirements are met. In this work, the timing behavior of a networked control developed using a Foundation Fieldbus-based network is studied and in particular the impact that communication parameters as jitter, macrocycle, and message scheduling have on control performance metrics like overshoot and settling time are evaluated both theoretically as well as experimentally.

**Keywords:** network control systems, foundation fieldbus, transport delay, scheduling.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> . . . . .	9
<b>LISTA DE TABELAS</b> . . . . .	12
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> . . . . .	13
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> . . . . .	14
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	15
<b>2 BASE CONCEITUAL</b> . . . . .	20
2.1 Métricas de desempenho de sistemas de controle . . . . .	20
2.2 Restrições Temporais . . . . .	21
2.3 Características de tráfego da comunicação . . . . .	22
2.4 Visão Geral sobre o barramento de campo Foundation Fieldbus . . . . .	23
<b>3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE EM ESCALONAMENTO E SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE</b> . . . . .	25
<b>3.1 Sistemas de Controle em Rede</b> . . . . .	25
3.1.1 Configuração de um sistema de controle em rede . . . . .	26
3.1.2 Atrasos dentro da malha de controle . . . . .	27
3.1.3 Características dos atrasos . . . . .	29
3.1.4 Efeitos dos atrasos nas malhas de controle . . . . .	30
3.1.5 Impacto da escolha do período de amostragem sobre o desempenho . . . . .	33
3.1.6 Novas metodologias de controle em rede . . . . .	35
<b>3.2 Escalonamento</b> . . . . .	47
3.2.1 Teoria de escalonamento de sistemas de tempo real . . . . .	47
3.2.2 Escalonamento de prioridade fixa . . . . .	47
3.2.3 Escalonamento por menor deadline primeiro (Earliest deadline first scheduling - EDF) . . . . .	49
3.2.4 Escalonamento baseado em servidores de controle . . . . .	50
<b>4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REDES FF SOB A INFLUÊNCIA DE ATRASOS GERADOS PELA COMUNICAÇÃO</b> . . . . .	53
<b>4.1 Análise teórica e simulações</b> . . . . .	53
4.1.1 Escalonamento de mensagens na rede Foundation Fieldbus . . . . .	53
4.1.2 Influência do aumento do número de laços . . . . .	54
4.1.3 Influência da alocação dos blocos funcionais . . . . .	55
4.1.4 Impacto da variação do período de amostragem sobre o desempenho . . . . .	55



<b>4.2</b>	<b>Análise experimental</b>	57
4.2.1	Equipamentos e softwares usados nos experimentos	58
4.2.2	Protótipo de sistema de segunda ordem	59
4.2.3	Planta Foundation Fieldbus	60
4.2.4	Software de configuração - Syscon	61
4.2.5	Software de monitoração de mensagens - FbView	61
4.2.6	Experimentos realizados	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	67
5.1	Experimento I	67
5.2	Experimento II	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	78
<b>7</b>	<b>ANEXOS</b>	80
	<b>REFERÊNCIAS</b>	89

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Arquitetura de controle (REIGH, 1999) . . . . .	15
Figura 2:	Descentralização do controle . . . . .	17
Figura 3:	Jitter de amostragem . . . . .	18
Figura 4:	Resposta típica ao salto unitário . . . . .	20
Figura 5:	Exemplo do Agendamento realizado pelo LAS . . . . .	23
Figura 6:	Transferência de Dados Periódicos e Aperiódicos . . . . .	24
Figura 7:	Malha de Controle Discreto . . . . .	26
Figura 8:	Sistema de controle em rede com estrutura direta . . . . .	27
Figura 9:	Sistema de controle em rede com estrutura hierárquica . . . . .	27
Figura 10:	Configuração geral de um sistema de controle em rede . . . . .	28
Figura 11:	Configuração geral de um sistema de controle em rede . . . . .	28
Figura 12:	Exemplo de um sistema de controle em malha fechada com atrasos . . . . .	30
Figura 13:	Degradação do desempenho de um sistema de controle sob influência de atrasos . . . . .	31
Figura 14:	Diminuição da margem de ganho em função do aumento do atraso na malha de controle . . . . .	32
Figura 15:	Resposta em frequência do sistema sob influência do atraso . . . . .	33
Figura 16:	Sistema de controle amostrado . . . . .	34
Figura 17:	Desempenho do controle digital em função do período de amostragem . . . . .	35
Figura 18:	Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia de compensação de atraso baseado em predição determinística) . . . . .	37
Figura 19:	Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia de compensação de atraso baseado em predição probabilística . . . . .	37
Figura 20:	Configuração de um Sistema de Controle em Rede na metodologia da perturbação . . . . .	39
Figura 21:	Janela de transmissões de dados dentro do período de amostragem $T_1$ da metodologia de escalonamento de tempo de amostragem . . . . .	40
Figura 22:	Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia de controle robusto . . . . .	42
Figura 23:	Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia baseada em modulação em lógica fuzzy . . . . .	43
Figura 24:	Função de pertinência de $e(t)$ . . . . .	44
Figura 25:	Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia baseada em eventos . . . . .	45
Figura 26:	Superfície de custo com respeito aos ganhos do controlador sob diferentes condições de QoS . . . . .	46

Figura 27:	Resposta ao degrau de um sistema de controle de velocidade de um motor DC na metodologia baseada em adaptação do controle do usuário final; x: sem adaptação, +:com adaptação . . . . .	46
Figura 28:	Exemplo de um servidor com largura de banda constante (constant bandwidth server -CBS) com largura de banda $U_s = 0.5$ e o período $T_s = 4$ atendendo aperiodicamente os trabalhos que chegam. As setas para cima indicam trabalhos que chegam e as setas para baixo as deadlines . . . . .	51
Figura 29:	Fluxograma do algoritmo de escalonamento . . . . .	53
Figura 30:	Exemplo de diferentes alocações de blocos funcionais para o mesmo algoritmo de controle . . . . .	55
Figura 31:	Sistema de controle amostrado . . . . .	56
Figura 32:	Simulações com variação na taxa de amostragem e controle . . . . .	57
Figura 33:	Simulações com variação na taxa de amostragem e controle (Considerando a precedência entre os blocos funcionais) . . . . .	58
Figura 34:	Diagrama em blocos do sistema de 2ª ordem implementado no protótipo . . . . .	59
Figura 35:	Diagrama esquemático do protótipo desenvolvido . . . . .	60
Figura 36:	Planta Foundation Fieldbus - Controle de Nível Monovariável . . . . .	61
Figura 37:	Configuração Física do experimento I . . . . .	62
Figura 38:	Configuração lógica da malha de controle implementada no experimento I . . . . .	63
Figura 39:	Configuração física do experimento II . . . . .	64
Figura 40:	Configuração lógica do experimento II . . . . .	65
Figura 41:	Histograma relativo aos períodos das mensagens DT3 . . . . .	67
Figura 42:	Evolução temporal dos períodos de amostragem da mensagem DT3 . . . . .	68
Figura 43:	Diagrama em blocos do sistema contínuo usado como referência . . . . .	69
Figura 44:	Resposta temporal do sistema ao degrau unitário . . . . .	69
Figura 45:	Diagrama em blocos do sistema de controle amostrado e processo contínuo . . . . .	69
Figura 46:	Resposta temporal do sistema de controle amostrado e processo contínuo . . . . .	70
Figura 47:	Resposta temporal do sistema projetado . . . . .	70
Figura 48:	Comparação entre a resposta temporal do sistema projetado e da simulação do sistema de controle amostrado e planta contínua . . . . .	71
Figura 49:	Histograma relativo aos períodos das mensagens DT3 . . . . .	72
Figura 50:	Evolução temporal dos períodos de amostragem da mensagem DT3 . . . . .	73
Figura 51:	Diagrama em blocos do sistema contínuo usado como referência . . . . .	73
Figura 52:	Resposta temporal do sistema ao degrau unitário . . . . .	74
Figura 53:	Diagrama em blocos do sistema de controle amostrado e processo contínuo . . . . .	74
Figura 54:	Resposta temporal do sistema de controle amostrado e processo contínuo . . . . .	75
Figura 55:	Resposta temporal do sistema projetado . . . . .	76
Figura 56:	Comparação entre a resposta temporal do sistema projetado e da simulação do sistema de controle amostrado e planta contínua . . . . .	76
Figura 57:	Comparação entre a resposta temporal do sistema projetado através do experimento 1 e experimento 2 . . . . .	77

Figura 58:	Corrente lida em função da tensão de entrada aplicada . . . . .	86
Figura 59:	Tensão em função da corrente gerada pelo transmissor FI302 . . . . .	87
Figura 60:	Circuito esquemático do sistema de 2 <sup>a</sup> ordem projetado . . . . .	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Influência do atraso nas margens de ganho e fase da função laço do sistema . . . . .	33
Tabela 2:	Resumo estatístico da monitoração das mensagens DT3 . . . . .	68
Tabela 3:	Resumo estatístico da monitoração das mensagens DT3 . . . . .	72
Tabela 4:	Parâmetros de desempenho dos sistemas apresentados . . . . .	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CBS	- Constant Bandwidth Server
DCS	- Distributed Control Systems
DDC	- Direct Digital Control
EDF	- Earliest Deadline First
FCS	- Field Control Systems
GCAR	- Grupo de Controle, Automação e Robótica
LAS	- Link Active Scheduler, gerenciador de link ativo
LASCAR	- Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica
PPGEE	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
NCS	- Networked Control Systems, sistemas de controle em rede

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau^{ca}$	Atraso gerado entre a transmissão da informação pelo controlador até a recepção da mesma pelo atuador
$\tau^{sc}$	Atraso gerado entre a transmissão da informação pelo sensor até a recepção da mesma pelo controlador
CT	- Constante de tempo dominante
$T_s$	- Tempo de acomodação
$M_p$	- Máximo sobrepasso do sistema
$\omega_\pi$	- Frequência crítica
$\omega_0$	- Frequência de cruzamento de ganho

# 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle industrial vêm nas últimas décadas apresentando uma evolução acentuada no que tange as arquiteturas de controle utilizadas nas mais diversas aplicações industriais de controle e automação. Segundo (REIGH, 1999) a arquitetura dos sistemas de controle de processos industriais evoluiu a partir do Direct Digital Control (DDC) em 1962, passou pelos controladores lógico programáveis (Programmable Logic Controllers - PLC) com origem em 1972, seguido pelos sistemas de controle distribuídos (Distributed Control Systems - DCS) em 1976, possibilitando posteriormente, o surgimento dos Field Control Systems (FCS) em 1994. Um dos FCS mais difundidos no mundo em aplicações industriais é o protocolo Foundation Fieldbus, apresentando diversas aplicações nas mais variadas áreas do segmento de processos, sendo aplicada desde indústrias químicas, petroquímicas, celulose e papel, tratamento de efluentes até aplicações voltadas à produção de açúcar e álcool. A Figura 1 apresenta a evolução descrita acima, assim como o deslocamento das funcionalidades relativas ao controle em direção aos equipamentos de mais baixo nível, isto é, em chão de fábrica.

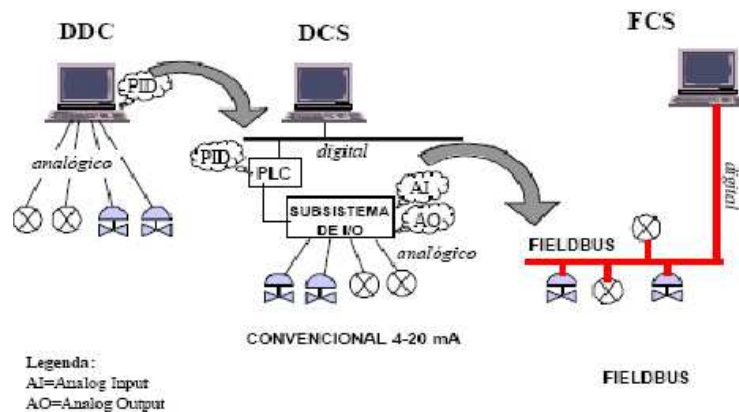


Figura 1: Arquitetura de controle (REIGH, 1999)

Como pode ser observado na Figura 1 o DDC apresenta todo o sistema de controle e supervisão vinculados a apenas uma única unidade central, responsável tanto pelo controle quanto pela supervisão do processo. Como mostrado, todos os sinais originados dos sensores, assim como os sinais destinados aos atuadores são analógicos, o que torna a comunicação bastante susceptível a ruídos de origem eletromagnética. O principal fator limitante desta arquitetura de controle é a dependência completa da unidade central, sendo que qualquer problema nesta unidade, acarreta a perda global da operacionalidade do sistema (tanto supervisão quanto sistema de controle).



Nos sistemas DCS, há uma separação entre unidade de supervisão e sistema de controle. O controle fica destinado ao PLC, uma unidade independente, com capacidade de processamento e que além das atividades relativas ao controle, fornece informações do processo a unidade de supervisão através de um canal de comunicação. Pode-se destacar também o surgimento de módulos remotos (denotado na Figura 1 por Subsistema de I/O), que são unidades robustas que suportam ambientes agressivos (temperaturas elevadas, umidade, etc) e se comunicam digitalmente com o PLC fornecendo os dados adquiridos pelos sensores, assim como, controlando atuadores vinculados ao sistema de controle. A separação entre supervisão e sistema de controle permitiu que a operacionalidade do sistema de controle independa do funcionamento do sistema de supervisão.

O FCS é uma rede industrial onde os transmissores e atuadores do sistema compartilham um mesmo meio físico de transmissão. A proposta principal do FCS é a distribuição do controle entre os dispositivos sensores, atuadores e controladores interligados em rede. Atualmente, diversas variantes de FCS encontram-se disponíveis no mercado, cada uma com peculiaridades próprias, geralmente envolvendo o tipo de escalonamento, políticas de acesso ao meio e composição dos frames de mensagens. Alguns exemplos:

- Foundation Fieldbus (<<http://www.fieldbus.org/>>)
- WorldFip (<<http://www.worldfip.org>>)
- DeviceNet (<<http://www.odva.org/>>)
- ControlNet (<<http://www.controlnet.org/>>)
- TTP (<<http://www.ttagroup.org/>>)
- CAN (<<http://www.can-cia.org/can/>>)
- HART (<<http://www.hartcomm2.org/>>)
- FTTCan (ALMEIDA, 2002)
- Profibus (<<http://www.profibus.com/pb/profibus/process/>>)

Na rede industrial Foundation Fieldbus (<<http://www.fieldbus.org/>>), foco de estudo deste trabalho, a comunicação entre os dispositivos é completamente digital, serial e half-duplex, o que garante maior imunidade a ruídos, economia em cabeamento e manutenção do sistema. Todos esses fatores contribuem significativamente na melhoria da confiabilidade do sistema como um todo (BIONDO, 1999). Os dispositivos participantes da rede Foundation Fieldbus além de possuírem capacidade de processamento, permitem uma completa descentralização das ações de controle, isto é, as funcionalidades e algoritmos de controle vinculados ao sistema podem ser compartilhados entre os diversos dispositivos da rede. A Figura 2 ilustra a descentralização das atividades de controle, agora compartilhadas entre os equipamentos participantes da rede, fazendo com que o sistema passe a ser caracterizado efetivamente como um sistema de controle distribuído.

Como pode ser observado na Figura 2, as diversas funcionalidades e algoritmos da dinâmica de controle (por exemplo, o algoritmo PID do controlador) são processados localmente nos dispositivos, havendo com isso, uma maior proximidade de toda lógica e algoritmos empregados em relação ao processo a ser controlado. Na mesma figura em questão, pode-se observar que o dispositivo com a função de LAS (Link Active Scheduler

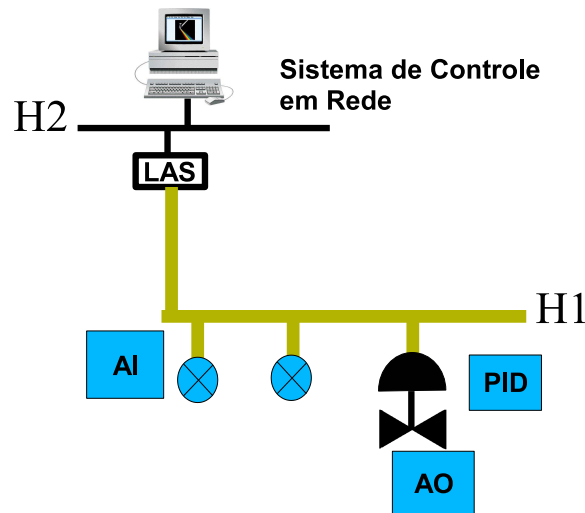


Figura 2: Descentralização do controle

- Agendador de link ativo) exerce o gerenciamento dos dispositivos da rede H1 (rede composta pelos transmissores e atuadores vinculados diretamente ao processo), acumulando também a função de gateway, fazendo com que a rede H2 (rede administrativa, destinada a supervisão e configuração de parâmetros do sistema de controle) possa se comunicar com a rede H1, seja enviando parâmetros de configuração para os dispositivos ou recebendo dados associados a supervisão do processo.

Com a descentralização do sistema de controle, a operacionalidade do sistema é ampliada, pois como a lógica e algoritmos de controle são empregados de forma distribuída e não existe uma unidade de processamento central, a perda de um dos componentes do sistema não acarreta a perda completa da funcionalidade do sistema de controle, que pode em muitos casos, manter o sistema em operação. Uma outra característica interessante é o fato dos próprios dispositivos do barramento terem a capacidade de gerenciar a rede H1 como LAS de segurança (backup), assumindo o gerenciamento do barramento caso o dispositivo com a função de LAS seja danificado (neste caso a funcionalidade da rede H1 é garantida ao passo que a comunicação com a rede H2 é perdida). Vale lembrar que o LAS é uma funcionalidade apresentada pelos dispositivos e não constitui um equipamento específico na rede Foundation Fieldbus.

A presença de processamento local em todos os transmissores/atuadores permitiu com que as funções de diagnóstico dos equipamentos e informações fossem amplamente melhoradas de modo a garantir uma melhor segurança operacional. Tais funções permitem que a operacionalidade dos equipamentos sejam acompanhadas em tempo de execução e, conjuntamente com informações estatísticas e informações relativas ao próprio equipamento em questão, manutenções preditivas e pró-ativas possam ser realizadas, levando com isso, a minimização do tempo de parada do processo.

A inserção de uma rede de comunicação em uma malha de controle influencia diretamente no desempenho do sistema. O desenvolvimento de um sistema de controle em rede (Networked Control Systems - NCS, (HALEVI, 1988), (NILSSON, 1998), (WALSH, 1999), (ZHANG, 2001)) ainda nos dias de hoje é algo bastante complexo. As teorias convencionais com muitas hipóteses ideais como: controle sincronizado, sensoriamento e atuação sem atrasos devem ser reavaliadas antes de serem aplicadas a um Sistema de Controle em Rede. Um dos aspectos a ser considerado é o atraso causado pela rede (atraso entre o envio da informação de sensoriamento, pelo sensor, até a recepção desta informa-

ção pelo controlador e o atraso entre o envio da informação de controle, pelo controlador, até a recepção desta informação pelo atuador) que ocorre durante a troca de dados entre dispositivos conectados no meio compartilhado. Este atraso, seja constante ou variável no tempo, pode degradar o desempenho do sistema de controle desenvolvido, podendo até afetar a estabilidade do processo.

Um dos tópicos de importância fundamental em sistemas de controle em rede é o escalonamento das mensagens do sistema. O projeto de um sistema de controle em rede com requisitos de tempo real é essencialmente um problema de projeto interdependente. Decisões realizadas no projeto de tempo real afetam o projeto do controle, e vice-versa. Por exemplo, a escolha de uma política de escalonamento influencia as distribuições de jitter de amostragem nas malhas de controle, e idealmente, isto deve ser levado em conta no projeto do sistema de controle. Da mesma forma, os requisitos de desempenho das malhas individuais de controle estabelecem demandas sobre o sistema de tempo real com relação a períodos, amostragem e jitter. O jitter de amostragem corresponde a variação do tempo de amostragem, como pode ser observado através da Figura 3.

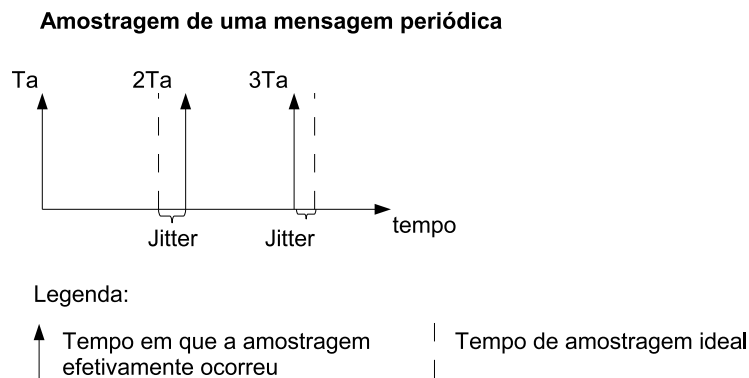


Figura 3: Jitter de amostragem

A grande maioria dos processos encontrados na indústria são constituídos de sistemas com uma dinâmica lenta se comparada aos tempos de processamento dos microprocessadores / microcontroladores usados em instrumentos inteligentes, sendo assim, pequenas variações no tempo de amostragem tendem a não afetar significativamente o desempenho do sistema. Todavia, compreender-se os limites em que tais variações podem ocorrer e quantificar a influência de tais ocorrências em relação ao desempenho do sistema de controle é de fundamental importância para que engenheiros de processo e de automação possam configurar/desenvolver seus sistemas de maneira a otimizar a operação das plantas.

A finalidade deste trabalho é a realização de uma análise de como a comunicação em uma rede industrial Foundation Fieldbus impacta no desempenho do sistema de controle. Tal análise permitirá que o desempenho de redes Foundation Fieldbus seja avaliado sob a ótica de sistemas de controle, tornando possível uma melhor compreensão da aplicabilidade e limitação das redes Foundation Fieldbus.

A metodologia a ser adotada consiste na realização de uma análise teórica, onde será realizado um estudo sobre o comportamento de malhas de controle de segunda ordem sob influência das variações dos períodos de amostragem e uma análise experimental, realizada em uma rede Foundation Fieldbus real, na qual serão executadas diferentes configurações de controle em rede, sob diferentes cargas de comunicação. Como base para a

realização dos experimentos será utilizada a Planta Piloto - Foundation Fieldbus descrita posteriormente na seção 4.2.3. Para permitir uma melhor análise do efeito de variações nos parâmetros da comunicação na rede Foundation Fieldbus, uma malha de controle adicional e com parâmetros configuráveis será utilizada. Esta malha de controle conterá um circuito eletrônico que representa o comportamento tempo-real de uma planta e de um controlador, nos quais as constantes de tempo podem ser configuradas pelo usuário. Fazendo uso de um sistema que requirite um tempo de amostragem suficientemente rápido (visto que para o cálculo do sinal de controle e para a manutenção da estabilidade do sistema é necessário que a informação do processo apresente coerência temporal e uma amostragem condizente com a dinâmica do processo), poderão ser realizados testes que avaliem a eficiência do escalonamento das mensagens no sistema Foundation Fieldbus e as possíveis conseqüências trazidas pelas eventuais variações de tempo de amostragem.

## 2 BASE CONCEITUAL

### 2.1 Métricas de desempenho de sistemas de controle

O desempenho dos sistemas de controle são mensurados basicamente através de sua resposta temporal a uma dada entrada. Para que se possa facilmente comparar o desempenho de dois sistemas, as especificações de desempenho são definidas em função da resposta a certas entradas padrão, tais como o salto e a rampa unitários (GOMES DA SILVA JR., 2006). A resposta de um sistema estável à aplicação de uma dada entrada pode ser dividida em duas partes: a resposta transitória e a resposta em regime permanente. A resposta transitória corresponde ao comportamento da saída do sistema durante um período de tempo que decorre logo após a aplicação de uma nova entrada ao sistema, neste período ocorrem variações significativas na saída do processo. É o tempo que o sistema demora para se acomodar (ou reagir) à nova entrada. Por outro lado, a resposta em regime permanente caracteriza o comportamento da saída do sistema quando este atinge um regime estacionário, sem grandes variações.

O desempenho em regime transitório de um sistema é avaliado, em geral, pela resposta temporal do sistema a uma entrada do tipo salto. Uma resposta típica a um salto unitário (referência constante) é apresentada na Figura 4.

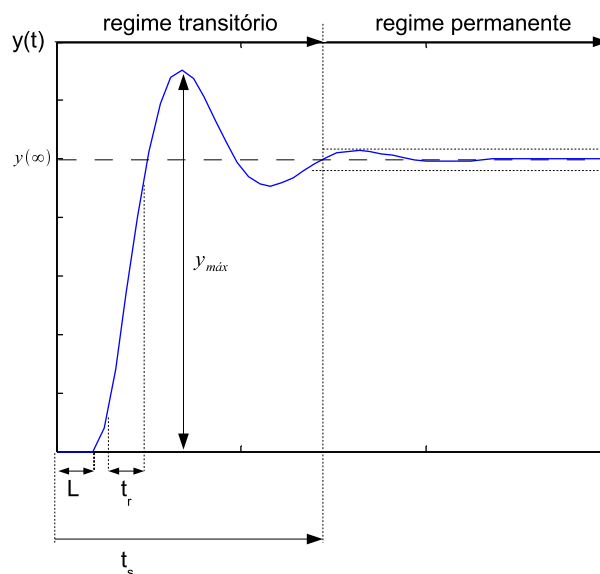


Figura 4: Resposta típica ao salto unitário

- **Máximo sobrepasso ( $M_o$ )** - supondo que o valor da saída ultrapasse seu valor de re-

gime permanente  $y(\infty)$ , o máximo sobrepasso é definido como a máxima diferença entre a saída  $y(t)$  durante o regime transitório e  $y(\infty)$  em regime permanente, ou seja, o valor de pico máximo atingido pela resposta menos o valor da saída quando o sistema já se encontra acomodado. Se a saída não ultrapassa o valor de regime permanente, o sobrepasso máximo é, por definição, igual a zero. O sobrepasso máximo é, em geral, dado em porcentagem:

$$M_o\% = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100$$

Em muitas aplicações, o sobrepasso é altamente indesejável e em todos os casos sobrepassos muito grandes são inaceitáveis. Por essa razão, o máximo sobrepasso é uma medida muito importante do desempenho de um sistema de controle. Além disso, o máximo sobrepasso é também um indicativo da estabilidade relativa do sistema. Quanto maior seu valor, menor a estabilidade relativa, isto é, mais próximo o sistema estará de apresentar um comportamento instável (GOMES DA SILVA JR., 2006).

- **Tempo de subida ( $t_r$ )** - é definido como o tempo transcorrido para a resposta ir de 10% a 90% do seu valor final. O tempo de subida é um indicativo de quão rápido reage o sistema à aplicação de um salto em sua entrada. Muitas vezes a redução excessiva do tempo de subida de um sistema, a partir da sintonia dos parâmetros de um controlador, pode provocar o aparecimento de um alto sobrepasso. Isso ocorre pelo fato que o sistema foi "acelerado" de tal maneira que se torna difícil "freá-lo", o que leva a saída a ultrapassar de maneira significativa o valor da entrada (GOMES DA SILVA JR., 2006).
- **Tempo de acomodação ( $t_s$ )** - é o tempo necessário para que a resposta entre e permaneça dentro de uma faixa percentual (2% ou 5%) em torno do valor de regime permanente.
- **Atraso de transporte ( $L$ )** - é o tempo decorrente para que uma variação no sinal de entrada do sistema seja efetivamente observada na variável de processo. Assim, se aplicarmos por exemplo, uma entrada do tipo salto em um processo com atraso de transporte e a saída do processo permanecer inalterada durante um intervalo de tempo  $T$ , este tempo  $T$  é o atraso de transporte. Entre as causas de ocorrência do atraso de transporte, pode-se citar: atraso na medida da variável de processo, ou seja, tempo em que o sensor leva para "sentir" que houve efetivamente uma variação, atraso na operação do atuador e atraso na ação do próprio controlador. Em geral, quanto maior o atraso de transporte, mais difícil é o controle do processo (GOMES DA SILVA JR., 2006).

## 2.2 Restrições Temporais

O desempenho estabelecido para os sistemas de controle demanda um determinado comportamento em tempo real do fluxo de informações e do processamento dos algoritmos de controle do sistema. Tal comportamento temporal implica em várias restrições temporais que devem ser atendidas e que são de fundamental importância para que o desempenho desejado seja efetivamente alcançado. As restrições temporais mais importantes citadas em (THOMESSE, 1998) são: periodicidade, jitter, tempo de resposta do processo de aplicação e diferente simultaneidade ou coerência de tempo de ações ou dados.

O jitter, mais especificamente referindo-se à taxa de amostragem do sistema, corresponde à variação da taxa de amostragem.

O tempo de resposta é definido como o atraso entre a demanda e resposta, isto é, entre os eventos de causa e efeito. A coerência de tempo expressa a propriedade relacionada com a ocorrência de dois ou mais eventos, pertencentes à uma respectiva janela temporal, isto é, caracteriza o teor da validade temporal dos eventos.

E finalmente, o frescor ou pontualidade (correção temporal) indica o quanto o valor de uma variável tem de qualidade perante uma janela temporal. Estas restrições podem ser especificadas ou modeladas por diversos tipos de teorias conforme cita o trabalho de (THOMESSE, 1998), mas nunca devem ser esquecidas ou deixadas de lado em um sistema de controle em rede.

### 2.3 Características de tráfego da comunicação

Os protocolos de comunicação em aplicações de automação e controle devem prover serviços adequados para a garantia de atendimento das restrições temporais quando elas existirem (THOMESSE, 1998). Alguns fieldbuses disponibilizam várias funcionalidades que contribuem para a criação de requisitos de tráfego diferentes, e outros nem consideram estes requisitos como pertinentes.

Durante a comunicação, um sistema fieldbus troca informações entre sensores e atuadores, controladores e atuadores, e controladores entre si. Os dados trocados entre estes elementos é definido como tráfego de dados identificado, pois suas características temporais são conhecidas antes do sistema entrar em atividade, ou seja, no estágio de especificação da aplicação. Nesta situação, estes dados podem ser modelados por modelos cliente-servidor, produtor-consumidor ou através de outras abordagens (THOMESSE, 1998).

Com relação ao tipo de variáveis trocadas no fieldbus, pode-se ter os seguintes tipos de tráfegos:

- **Tráfego periódico ou cíclico (tráfego horizontal):** caracteriza-se pela troca de dados entre entradas e saídas dos componentes do sistema de controle. São transmitidos periodicamente, sendo que cada dado pode possuir seu próprio período (THOMESSE, 1998). Estes dados são produzidos durante a troca de variáveis de medição e controle, geralmente caracterizados como críticos em relação ao tempo (FRANCO, 1998). Jitters podem ou não ser aceitos pelas aplicações, sendo assim, os protocolos podem apresentar regras mais rígidas ou mais tolerantes em relação à variação da periodicidade das informações circulantes no sistema de controle (THOMESSE, 1998). Os sistemas que contém este tipo de tráfego são geralmente denominados como sistemas disparados por tempo (Time triggered systems).
- **Tráfego aperiódico ou acíclico (tráfego vertical):** estas variáveis não mudam de valor periodicamente, pois têm ocorrência aleatória no tempo podendo ser alteradas através da ocorrência de algum evento no sistema. Estas estão associadas aos sistemas disparados por evento (Event triggered systems).

A distinção do tráfego expressa a preocupação em relação ao atendimento das restrições temporais da aplicação que estão condicionadas ao tipo de tráfego do sistema a ser tratado. A maioria dos fieldbuses é caracterizada como sistemas disparados por tempo, no entanto, alguns deles combinam ambas abordagens (como é o caso do Foundation Fieldbus).

## 2.4 Visão Geral sobre o barramento de campo Foundation Fieldbus

Em um sistema de controle em rede baseado no barramento de campo Foundation Fieldbus, todos os dispositivos pertencentes ao barramento comunicam-se entre si através de um protocolo digital, multi-ponto e half-duplex. A comunicação dos dispositivos é gerenciada por um Agendador de Link Ativo (Link Active Scheduler - LAS) que é responsável por todo escalonamento das mensagens que circulam no barramento. As mensagens que circulam no barramento podem ser periódicas ou aperiódicas. Mensagens periódicas, como definido anteriormente, são geralmente dados críticos que necessitam de determinismo temporal, sendo que apresentam fundamental relevância nas ações de controle. As mensagens aperiódicas são aquelas que não apresentam um período fixo definido e geralmente não são informações críticas que necessitam de determinismo temporal para o correto funcionamento do sistema.

O escalonamento de mensagens é realizado de forma dinâmica pelo Agendador de Link Ativo (LAS), que utiliza um algoritmo específico para definir uma agenda a ser seguida por todos os dispositivos do barramento. Cada dispositivo do barramento possui um macrociclo (uma única iteração da agenda do LAS dentro de um dispositivo específico do barramento) onde parte deste macrociclo é reservado as mensagens periódicas e o tempo restante é utilizado para transmissão de mensagens aperiódicas. A Figura 5 apresentada em (SMAR, 2004) dá um exemplo da forma como é realizado o agendamento da comunicação pelo LAS em uma malha de controle simples, constituída por um bloco AI, um bloco PID e um bloco AO, sendo que o bloco AI é executado no dispositivo 1 e os outros dois blocos funcionais são executados no dispositivo 2.

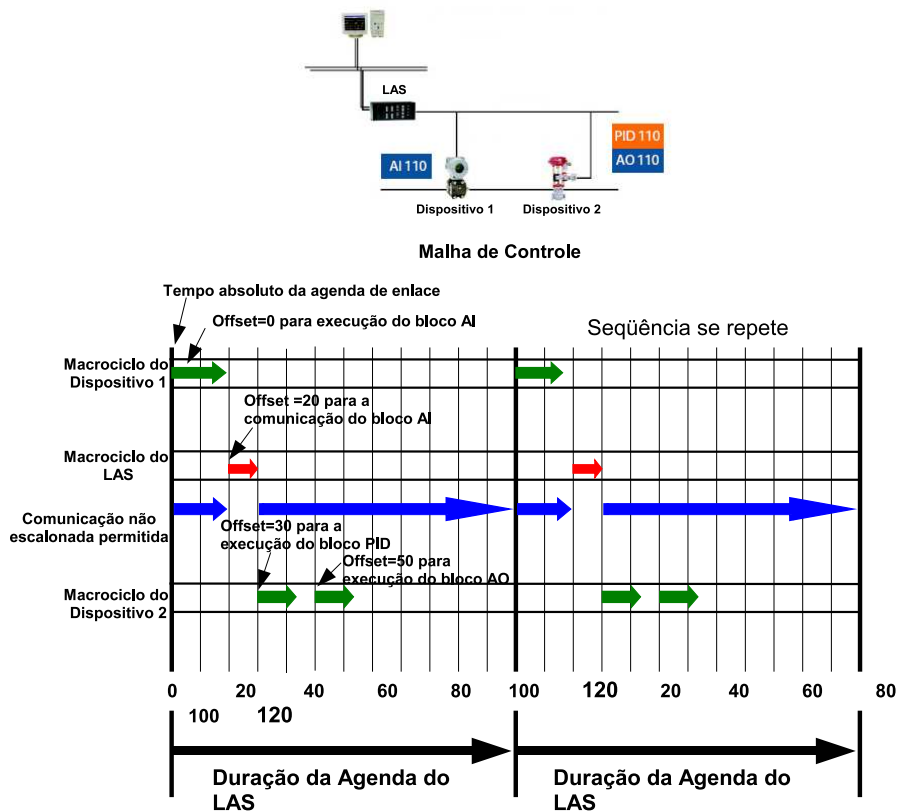
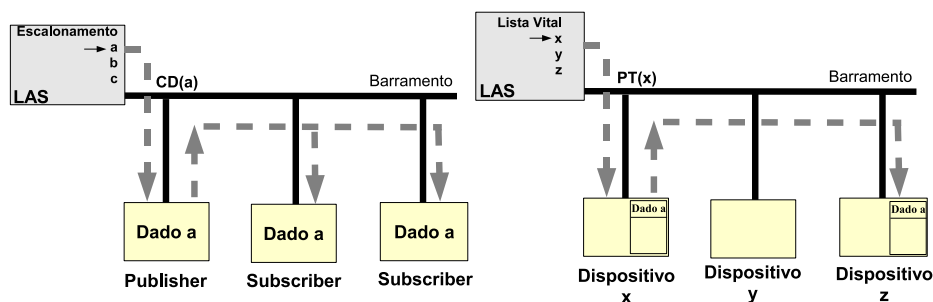


Figura 5: Exemplo do Agendamento realizado pelo LAS





Transmissão de Mensagens Periódicas

Transmissão de Mensagens Aperiódicas

Figura 6: Transferência de Dados Periódicos e Aperiódicos

Como é denotado através da Figura 5, o sistema de gerenciamento no transmissor fará com que o bloco funcional **AI** execute no offset 0. No offset 20 o gerenciador de link ativo (LAS) irá enviar uma mensagem de solicitação de dados (compel data - CD) para o buffer do bloco funcional **AI** e o dado contido no buffer do transmissor será publicado no barramento. No offset 30 o sistema de gerenciamento na válvula executará o bloco funcional **PID** seguido da execução do bloco funcional **AO** no offset 50. A rotina descrita se repete garantindo a integridade da dinâmica da malha de controle apresentada. Pode-se ressaltar que o barramento somente é ocupado por mensagens síncronas relativas à malha definida, durante o intervalo compreendido entre os offsets 20 e 30. A seta de progressão azul, mostrada na Figura 5, evidencia que o barramento está livre, e portanto, pode ser usado para transmissões que se tornarem necessárias.

Os procedimentos que envolvem a transmissão de mensagens periódicas e aperiódicas em redes Foundation Fieldbus podem ser vistos através da Figura 6 apresentada em (SMAR, 2004).

Pode ser observado na Figura 6 que chegado o momento de uma mensagem periódica ser publicada no barramento, o Agendador de Link Ativo (LAS) envia uma mensagem de solicitação de dados (compel data - CD) para o dispositivo em questão e este "publica" a mensagem no barramento para que todos os dispositivos que tenham requisitado a mensagem possam captá-la (este tipo de comunicação é também conhecido por publisher/subscriber). Na transmissão de mensagens aperiódicas, o LAS envia para o dispositivo uma mensagem de passagem de token (Pass Token - PT) onde este então tem a permissão temporária de fazer uso do barramento para transmitir suas mensagens aperiódicas.

### **3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE EM ESCALONAMENTO E SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE**

Os sistemas de controle em rede constituem uma área relativamente nova, tornando-se portanto, alvo de intensos estudos para o desenvolvimento de novas teorias, assim como o aperfeiçoamento das teorias já estabelecidas. Muitos estudos voltados a esta área são direcionados principalmente ao desenvolvimento de novas técnicas e metodologias de modelagem, análise de estabilidade e desenvolvimento de novos sistemas de controle que atendam aos requisitos de desempenho desejados mesmo sob influência do ônus trazido pela inserção da rede no sistema.

No entanto, muitas destas abordagens lidam com o atraso gerado pela comunicação na rede como um fato inerente ao próprio sistema de controle em rede, tentando com isso, combater os efeitos causados pelo atraso e não o atraso em si. Para se aumentar a eficiência do sistema como um todo torna-se essencial o estudo do escalonamento de mensagens nos sistemas de controle em rede de maneira a obter-se uma comunicação ótima, a fim de se minimizar os atrasos da comunicação para que não haja conseqüências desastrosas sob qualquer ponto de operação do sistema.

Um estudo prévio foi realizado a fim de se contextualizar e de se relacionar duas áreas que apresentavam abordagens distintas até o surgimento dos sistemas de controle em rede, sendo assim, o estudo do escalonamento e dos sistemas de controle conjuntamente tornam-se um requisito imprescindível para o projeto de sistemas que almejam um desempenho ótimo sob o ponto de vista dos sistemas de controle cooperativamente com o respaldo das características de tempo real fornecidas pelas teorias de escalonamento.

#### **3.1 Sistemas de Controle em Rede**

Com o avanço da eletrônica digital e a substancial queda nos preços dos computadores, os antigos sistemas de controle analógico foram perdendo espaço e cedendo lugar aos sistemas de controle digitais, amplamente difundidos nos dias de hoje. As teorias de controle até então desenvolvidas baseando-se na natureza contínua de suas aplicações tiveram que ser revistas e reelaboradas visando levar em consideração a natureza discreta dos eventos ocorridos no âmbito computacional.

As teorias de controle amostrado foram solidamente desenvolvidas e constituí-se uma área com forte embasamento teórico e aplicação prática. Até o advento dos sistemas de controle em rede, as aplicações dos sistemas de controle amostrado eram baseados em sistemas dedicados e com forte presença de determinismo temporal, o que garantia a previsibilidade do comportamento temporal do sistema fornecida pelas teorias de controle digital. A limitação deste tipo de aplicação se encontra no fato de apresentar um controle

centralizado e pouco flexível. Dentre as várias configurações possíveis para os sistemas de controle amostrado, uma bastante aplicada e amplamente conhecida é apresentada pela Figura 7.

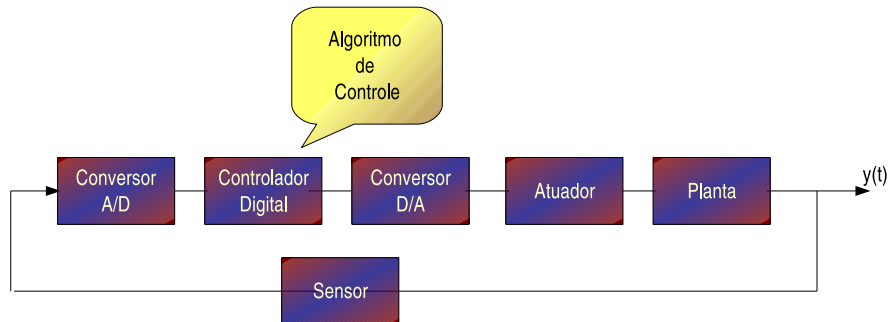


Figura 7: Malha de Controle Discreto

A Figura 7 representa um sistema de controle digital onde a variável do processo (Planta) é captada por um sensor que gera um sinal elétrico analógico proporcional à grandeza medida, em seguida esta informação é enviada para um conversor A/D, responsável pela conversão do sinal analógico recebido para um sinal digital que será utilizado pelo controlador na execução do algoritmo de controle implementado. Depois de executado o algoritmo de controle, o controlador digital transmite o resultado do algoritmo para um conversor D/A que se encarrega de realizar a conversão do sinal digital fornecido pelo controlador para um sinal analógico, que por sua vez é aplicado ao atuador, responsável pela ação de controle. Vale lembrar que o sinal de referência (geralmente denotado por  $r(t)$ ) é usualmente amostrado no início de cada ciclo de execução do laço de controle e disponibilizado ao controlador digital.

Deve-se ressaltar que todo o algoritmo de controle é centralizado no controlador digital e, os atrasos gerados nos conversores A/D e D/A, assim como o atraso gerado pela execução do algoritmo de controle são tão pequenos (tendo em vista os avanços alcançados na parte de hardware) em relação à dinâmica dos processos controlados que o impacto gerado pelos atrasos no desempenho dos sistemas pode ser desconsiderado.

### 3.1.1 Configuração de um sistema de controle em rede

Existem basicamente duas configurações gerais de um sistema de controle em rede, as quais apresentam as seguintes estruturas:

- **Estrutura Direta:** é composta de um controlador e um sistema remoto que contém uma planta física, sensores e atuadores. O controlador e a planta estão localizados em locais físicos diferentes e são interligados através de uma rede de dados para que seja executado o controle em malha fechada do sistema. Um esboço da estrutura explanada é mostrado pela Figura 8.

O sinal de controle é encapsulado dentro de um frame ou pacote e enviado para a planta através da rede. A planta então retorna a saída do sistema para o controlador colocando a medida do sensor dentro de um frame ou pacote da mesma maneira. Em implementações práticas, controladores múltiplos podem ser implementados em uma simples unidade de hardware para controlar múltiplas malhas em uma estrutura direta.

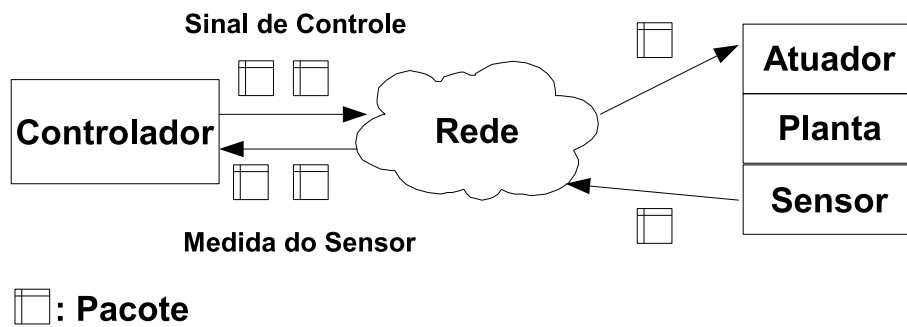


Figura 8: Sistema de controle em rede com estrutura direta

- **Estrutura Hierárquica:** consiste em um controlador principal e um sistema em malha fechada remoto como mostrado na Figura 9.

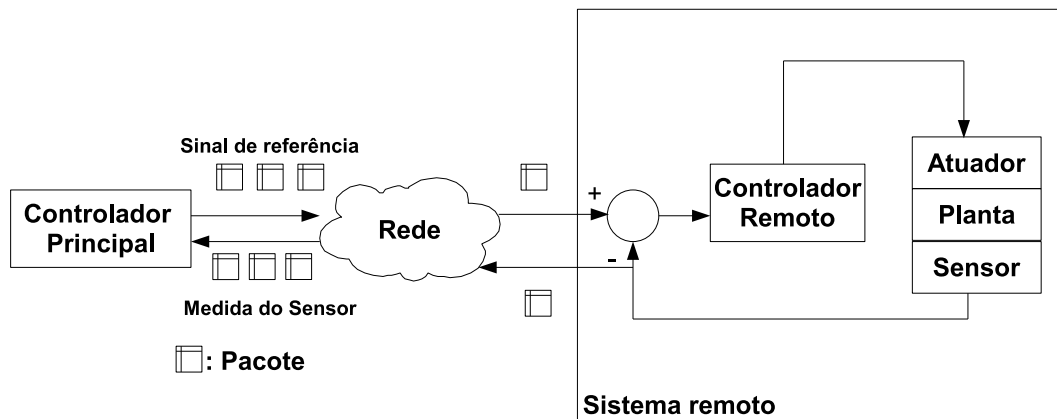


Figura 9: Sistema de controle em rede com estrutura hierárquica

Periodicamente, o controlador principal computa e envia o sinal de referência em um frame ou pacote através da rede para o sistema remoto. O sistema remoto então processa o sinal de referência para executar o controle em malha fechada e retorna a medida do sensor para o controlador principal, para o controle em malha fechada através da rede. A malha de controle através da rede geralmente possui períodos de amostragem maiores que os períodos das malhas locais visto que o controlador remoto deve satisfazer o sinal de referência antes de processar o novo sinal de referência que chegará. Similarmente à estrutura direta, o controlador principal pode ser implementado para lidar com múltiplas malhas fechadas em rede para diversos sistemas remotos. Esta estrutura é muito usada em diversas aplicações incluindo robôs móveis e teleoperação.

### 3.1.2 Atrasos dentro da malha de controle

Nos sistemas de controle em rede houve a inserção de uma rede de comunicação entre os diversos componentes do sistema de controle, distribuindo com isso, o processamento e as lógicas de controle entre os mesmos. O problema trazido pela inserção da rede na malha de controle foi que os atrasos, antes desprezíveis pelo fato de todo o processamento

e algoritmo serem centralizados em um controlador e o fluxo de informações ser unidirecional e pequeno, ganharam uma magnitude de tal forma que passaram a ter relevância no desenvolvimento do sistema.

A configuração geral dos sistemas de controle em rede é mostrada através da Figura 10, juntamente com seu diagrama temporal apresentado pela Figura 11.

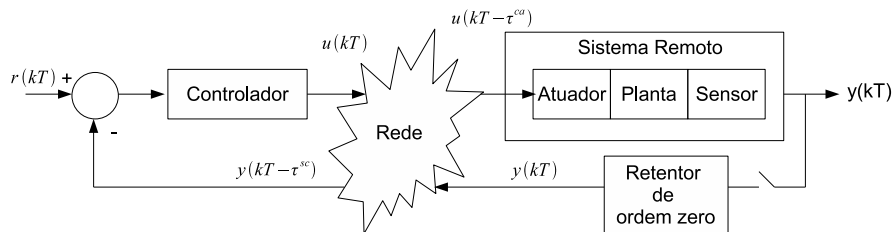


Figura 10: Configuração geral de um sistema de controle em rede

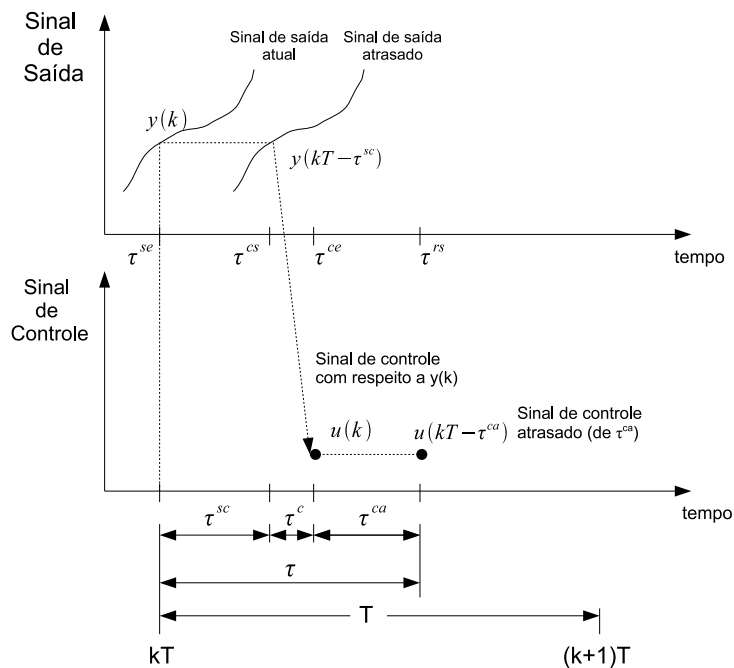


Figura 11: Configuração geral de um sistema de controle em rede

Como é denotado pelas Figuras 10 e 11, as informações anteriormente fornecidas deterministicamente nas aplicações de controle digital (leia-se: a variável do processo  $y(kT)$  e a variável manipulada  $u(kT)$ ) passaram a sofrer influência de atrasos ocorridos devido a inserção da rede de comunicação entre os diversos componentes do sistema, com isso, devido a magnitude e frequência dos atrasos, seus efeitos não podem mais ser negligenciados. A variável do processo  $y(kT)$  não é mais transmitida ao controlador via um canal dedicado, assim como a variável manipulada  $u(kT)$ . Nos sistemas de controle em rede há a utilização de um meio comum para a realização da transmissão das informações, sendo assim, eventuais atrasos, ocasionados em sua maioria em decorrência dos algoritmos de escalonamento adotados, são verificados durante a operação dos sistemas de controle em rede como evidenciado na Figura 11.

Os atrasos em um sistema de controle em rede podem ser classificados levando-se em consideração a direção da transferência dos dados como sensor-para-controlador, denotado por  $\tau^{sc}$ , e como controlador-para-atuador, representado por  $\tau^{ca}$ . Tais atrasos, como se pode notar através da análise da Figura 11, são resultados das seguintes operações:

$$\begin{aligned}\tau^{sc} &= \tau^{cs} - \tau^{se} \\ \tau^{ca} &= \tau^{rs} - \tau^{ce}\end{aligned}$$

Onde  $\tau^{se}$  é o instante de tempo em que o sistema remoto encapsula a medição no frame ou pacote para ser enviado,  $\tau^{cs}$  é o instante de tempo em que o controlador inicia o processamento da medição entregue pelo frame ou pacote,  $\tau^{ce}$  é o instante de tempo que o controlador principal encapsula o sinal de controle em um pacote para ser enviado, e  $\tau^{rs}$  é o instante de tempo que o sistema remoto inicia o processamento do sinal de controle. De fato, ambos atrasos ocasionados pela rede podem ser maiores ou menores que o período de amostragem  $T$ . Embora o atraso de processamento do controlador  $\tau^c$  sempre exista, este atraso é usualmente pequeno (levando-se em consideração algoritmos de controle simples como: controle PID, avanço-atraso, etc) quando comparado aos atrasos ocasionados pela presença da rede de comunicação e podem ser desconsiderados. Uma outra possibilidade é dos períodos de amostragem do controlador principal e do sistema remoto serem diferentes.

Os atrasos  $\tau^{sc}$  e  $\tau^{ca}$  são compostos de no mínimo três partes (LIAN, 2001), sendo:

- **Atraso por tempo de espera,  $\tau^W$** : atraso pelo qual a fonte (o controlador principal ou sistema remoto) tem que esperar em fila ou por disponibilidade da rede, antes de realmente enviar um frame ou pacote.
- **Atraso por tempo de frame,  $\tau^F$** : atraso que ocorre durante o momento em que o nó que enviará a mensagem está colocando um frame ou pacote na rede de comunicação.
- **Atraso de propagação,  $\tau^P$** : atraso gerado pela propagação do frame ou pacote através do meio físico

Essas três partes do atraso são atrasos fundamentais que ocorrem em uma rede local (LAN). Quando os dados de controle ou dos sensores navegam entre redes, poderão existir outros atrasos, tais como: atrasos de filas em switches ou roteadores e atrasos de propagação entre nós intermediários. Os atrasos  $\tau^{sc}$  e  $\tau^{ca}$  também dependem de outros fatores como máxima largura de banda das especificações dos protocolos e tamanhos dos pacotes ou frames.

Protocolos de camadas de rede superiores como o TCP podem requerer retransmissões se um erro ocorre na transmissão de um pacote ou se um switch ou roteador descarta um pacote. Mesmo embora algum sinal de controle ou de sensor se perca nas transmissões da rede, alguns sistemas de controle em rede podem operar de forma aceitável. Nestes casos, retransmissões podem ser indesejáveis, visto que o sistema de controle em rede pode ser severamente afetado pelo prolongamento dos atrasos como resultado da retransmissão.

### 3.1.3 Características dos atrasos

As características dos atrasos dependem basicamente do tipo da rede. Alguns protocolos de rede são abordados a seguir, assim como as características dos atrasos gerados.

- Redes de serviço cíclico.** Em protocolos de rede local com serviços cíclicos, como IEEE 802.4, SAE Token bus, Profibus, IEEE 802.5, SAE Token ring, MILSTD-1553B, IEC 61158-2 (Foundation Fieldbus) e FIP, os sinais de controle e sensores são transmitidos em ordem cíclica com comportamentos determinísticos onde algoritmos de correção temporal são utilizados para manter os relógios dos dispositivos sincronizados entre si. Sendo assim, os atrasos gerados são periódicos e podem ser simplesmente modelados como uma função periódica tal que  $\tau_k^{sc} = \tau_{k+1}^{sc}$  e  $\tau_k^{ca} = \tau_{k+1}^{ca}$ , onde  $\tau^{sc}$  e  $\tau^{ca}$  são os atrasos das transmissões sensor-para-controlador e controlador-para-atuador a uma taxa de amostragem com período  $k$  (HALEVI, 1988). Os modelos funcionam perfeitamente no caso ideal. Na prática, sistemas de controle em rede podem apresentar pequenas variações nos atrasos periódicos devido muitas razões. Por exemplo, as discrepâncias nos geradores de clock entre o controlador e um sistema remoto podem resultar em variações no atraso. Com a finalidade de minimizar tais discrepâncias são utilizados algoritmos de correção temporal juntamente com a constante atualização dos clocks através de mensagens de distribuição de tempo (time distribution).
- Redes de acesso aleatório.** Redes locais de acesso aleatório como CAN e Ethernet envolvem mais incertezas. As partes significantes dos atrasos aleatórios de rede são os atrasos por tempo de espera relacionados a filas e colisões de pacotes na rede. Quando um sistema de controle em rede opera através de redes, muitos outros fatores podem aumentar a aleatoriedade dos atrasos de rede tais como os tempos de fila em uma switch ou roteador e os atrasos de propagação relacionados as diferentes rotas de rede. Adicionalmente, uma rede de serviços cíclicos conectada a uma rede de acesso aleatório também resulta em atrasos aleatórios. Na área de redes, atrasos de rede aleatórios têm sido modelados através do uso de várias formulações baseadas em probabilidade e nas características das fontes e destinos (NILSSON, 1998).

### 3.1.4 Efeitos dos atrasos nas malhas de controle

#### 3.1.4.1 Degradação do desempenho

Os atrasos nas malhas de controle são conhecidos por degradarem o desempenho dos sistemas de controle, da mesma forma, agem os atrasos gerados pela comunicação em um sistema de controle em rede. Através de um sistema de controle PI (Proporcional-Integral) em malha fechada (apresentado pela Figura 12) é ilustrado, em (TIPSUWAN, 2003), um exemplo da degradação do desempenho do sistema pelos atrasos presentes na malha de controle, onde  $R(s)$ ,  $U(s)$ ,  $Y(s)$ , e  $E(s) = R(s) - Y(s)$  são os sinais de referência, controle, saída e erro no domínio de Laplace de acordo com os sinais de referência, controle, saída e erro do domínio do tempo, respectivamente.

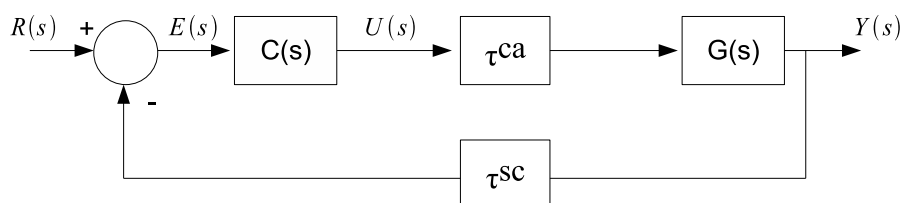


Figura 12: Exemplo de um sistema de controle em malha fechada com atrasos

As funções de transferência do controlador e da planta são descritas a seguir.

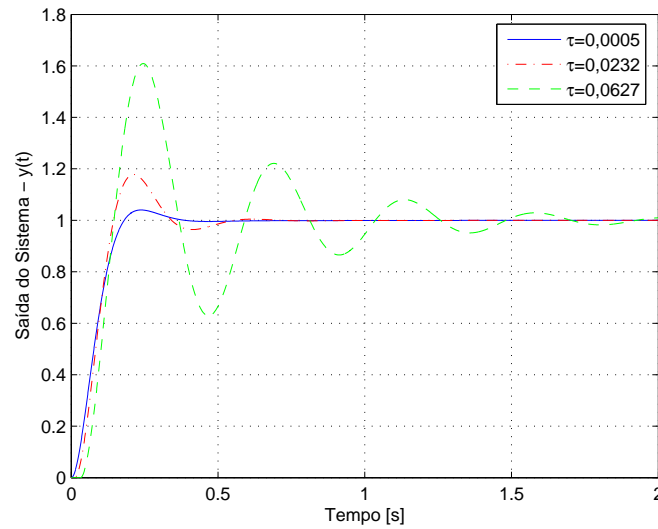


Figura 13: Degradação do desempenho de um sistema de controle sob influência de atrasos

$$C(s) = \frac{\beta \cdot K_p \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{s}$$

$$K_p = 0,1701 \quad K_i = 0,378$$

$$G(s) = \frac{2029,826}{(s + 26,29)(s + 2,296)}$$

Onde  $C(s)$  é o controlador PI (Proporcional-Integral),  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  é o ganho integral,  $G(s)$  é a planta de um motor DC (TIPSUWAN, 1999) e  $\beta$  é um parâmetro de ajuste de  $K_p$  e  $K_i$ . Neste exemplo foi usado,  $\beta = 1$ . Através da análise da Figura 13, pode-se constatar a degradação do desempenho do sistema em relação ao aumento dos atrasos  $\tau^{ca} = \tau^{sc} = \frac{\tau}{2}$ . As consequências visíveis são o aumento do sobrepasso máximo e o prolongamento do tempo de acomodação. Outros tipos de degradação do desempenho podem ser avaliados baseados em diferentes métricas de desempenho. Análises sobre os efeitos dos atrasos sobre as medidas de desempenho podem ser usadas para o desenvolvimento apropriado de novas metodologias de controle.

#### 3.1.4.2 Efeito desestabilizador causado pelo atraso

Atrasos na malha de controle, incluindo atrasos na comunicação em redes, podem desestabilizar o sistema através da redução da margem de estabilidade do mesmo. Novamente o exemplo apresentado pela Figura 12 é usado para ilustrar como os atrasos podem reduzir a região de estabilidade. A Figura 14 mostra as curvas do lugar das raízes do sistema representado pela Figura 12 com respeito ao parâmetro  $\beta$ . Neste caso, aumentar  $\beta$  é equivalente a incrementar  $K_p$  e  $K_i$  enquanto ambos mantêm a mesma razão. Apenas as primeiras curvas são mostradas porque são suficientes para aproximarem a região de estabilidade (KUO, 1987).

Para que o lugar das raízes pudesse ser obtido, os atrasos  $\tau^{sc}$  e  $\tau^{ca}$  foram aproximados por modelos gerados através da aproximação de Padé de primeira ordem. Tais modelos são definidos da seguinte forma:



$$e^{-\tau^{sc}s} = e^{-\tau^{ca}s} = e^{\frac{-\tau \cdot s}{2}} = \frac{1 - \frac{\tau \cdot s}{4}}{1 + \frac{\tau \cdot s}{4}}$$

Como mostrado na Figura 14, quando o atraso  $\tau$  cresce, as primeiras curvas do lugar das raízes se deslocam em direção ao eixo imaginário e  $\beta$ , no ponto em que as curvas cruzam o eixo imaginário, é menor. Este resultado indica uma diminuição da margem de ganho desde que o controlador PI tem uma faixa menor de valores viáveis para usar, valores esses, que garantem a estabilidade do sistema de controle em malha fechada.

Existem vários estudos, como o apresentado em (ZHANG, 2001), que visam estabelecer um critério de estabilidade para sistemas de controle em rede de modo a garantir que tais sistemas permaneçam estáveis dentro de certas condições. Contudo, não existe um critério de estabilidade generalizado que possa ser aplicado em todos sistemas de controle em rede. A maioria das técnicas de análise de estabilidade é sujeita a configurações de rede, protocolos, hipóteses e técnicas de controle usadas nos sistemas em estudo.

Uma análise da estabilidade para sistemas discretos com atrasos (ASTRÖM, 1990) pode ser aplicada para sistemas de controle em rede com atrasos constantes. Para sistemas com atrasos aleatórios são necessários algoritmos de análise de estabilidade mais sofisticados, baseados em análise de estabilidade estocástica e direcionados as peculiaridades do protocolo de rede em questão.

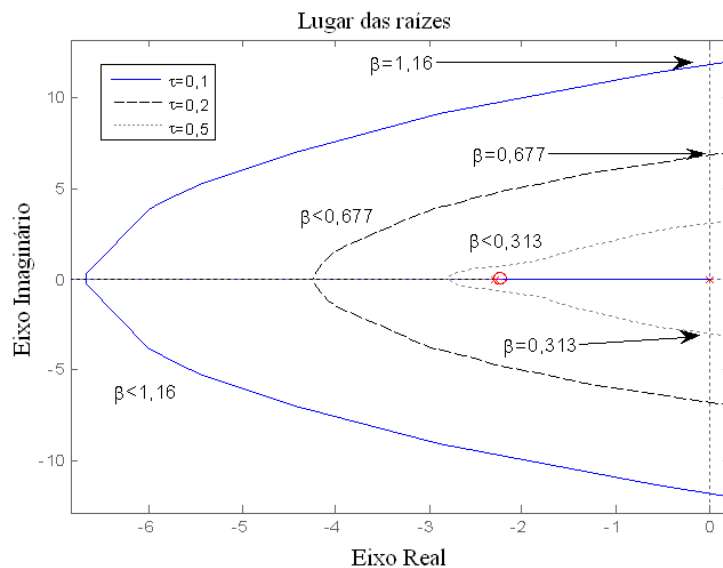


Figura 14: Diminuição da margem de ganho em função do aumento do atraso na malha de controle

A resposta em frequência, denotada pela Figura 15, também pode ser usada para demonstrar o efeito desestabilizador causado pelo atraso. A mesma aproximação de Padé apresentada anteriormente foi usada na obtenção da resposta em frequência do sistema.

A determinação da estabilidade do sistema em questão leva em consideração a margem de ganho e a margem de fase da resposta em frequência da função de laço do sistema  $(C(s)\tau^{ca}(s)G(s)\tau^{sc}(s))$ , sendo que, para a estabilidade ser garantida ambas devem apresentar valores positivos. A margem de ganho é definida como a diferença entre 0 dB e o ganho da função de laço na frequência crítica  $\omega_\pi$  (frequência cuja fase é  $\pm 180^\circ$ ). A margem de fase é definida como sendo a diferença entre a fase da função de laço do sistema

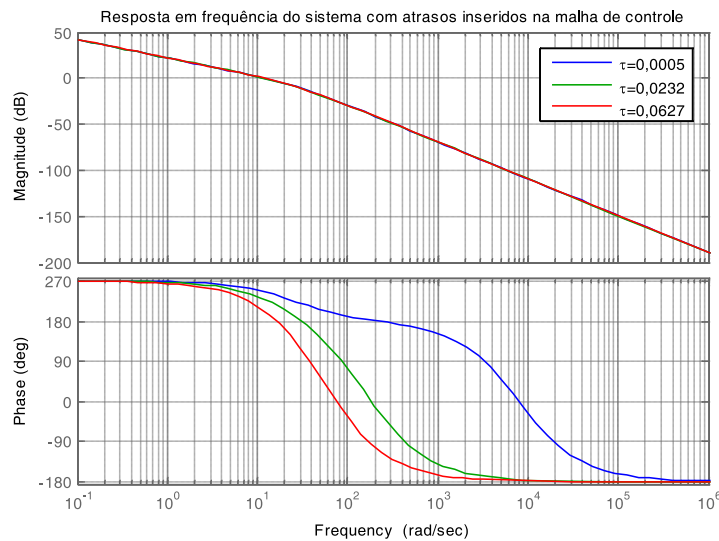


Figura 15: Resposta em frequência do sistema sob influência do atraso

na frequência de cruzamento de ganho  $\omega_0$  (frequência onde o ganho da função de laço é 0 db = 1) e a fase correspondente à frequência crítica ( $\pm 180^\circ$ ). A Tabela 3 apresenta as margens de fase e ganho correspondentes a Figura 15.

Tabela 1: Influência do atraso nas margens de ganho e fase da função laço do sistema

$\tau$	MG (dB)	MF ( $^\circ$ )	$\omega_0$ (rad/s)	$\omega_\pi$ (rad/s)
0,0005	43,70	65,6	11,9	229,0
0,0232	11,20	50,1	11,9	30,8
0,0627	3,45	23,5	11,9	16,5

O termo MG representa a margem de ganho do sistema, MF a margem de fase,  $\omega_0$  a frequência de cruzamento de ganho e  $\omega_\pi$  a frequência crítica.

Realizando uma análise da Tabela 3 pode-se concluir que há uma diminuição nítida nas margens de fase e ganho do sistema. Embora a estabilidade seja mantida para os três casos (pois tanto a margem de ganho quanto a margem de fase do sistema são positivas), existe uma degradação nas margens de fase e ganho, fazendo com que a fase na frequência de cruzamento de ganho  $\omega_0$  e o ganho na frequência crítica  $\omega_\pi$ , se aproximem do limite de estabilidade para os casos onde os atrasos em questão são mais significativos.

### 3.1.5 Impacto da escolha do período de amostragem sobre o desempenho

A escolha do período de amostragem apresenta importância fundamental na implementação de um sistema de controle digital, pois deve ser garantida uma amostragem suficientemente rápida para que o algoritmo de controle tenha dados tão atuais quanto possível para seu processamento. Sistemas que não são amostrados a uma taxa condizente com a dinâmica do processo controlado correm o risco de comprometer a operacionalidade do sistema de controle e a estabilidade do sistema como um todo.

Para ilustrar o efeito mencionado acima, foi utilizado o mesmo modelo apresentado na seção 3.1.4.1, descrito pelas seguintes funções de transferência:

$$C(s) = \frac{\beta \cdot K_p (s + \frac{K_i}{K_p})}{s}$$

$$K_p = 0,1701 \quad K_i = 0,378$$

$$G(s) = \frac{2029,826}{(s + 26,29)(s + 2.296)}$$

Vale lembrar que os atrasos serão desconsiderados neste exemplo, visto que, o foco principal é apresentar o efeito da escolha do período de amostragem no desempenho do sistema de controle. O sistema implementado neste exemplo é descrito pela Figura 16.

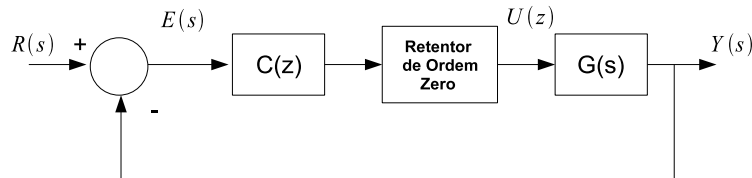


Figura 16: Sistema de controle amostrado

Onde  $C(z)$  representa o modelo discreto do controlador, obtido através da aproximação de Tustin (também conhecida por bilinear) e levando-se em consideração os respectivos períodos de amostragem para cada simulação realizada. O processo é representado pela função transferência  $G(s)$ , o sinal de controle discreto por  $U(z)$ , o sinal de referência por  $R(s)$ , o erro por  $E(s)$  e a saída do sistema por  $Y(s)$ .

Uma abordagem detalhada destinada a escolha do período de amostragem é realizada em (ASTRÖM, 1990) e (FRANKLIN, 1994) onde, entre outros, aspectos como custos de implementação e algoritmos numéricos são levados em consideração. Como regra geral, aplicável em grande número de casos, o período de amostragem deve ser tal que ocorram ao menos cinco amostras da saída por constante de tempo dominante do processo (GOMES DA SILVA JR., 2006).

O sistema usado nesta verificação trata-se de um sistema de segunda ordem, mas pode ser representado como a combinação das dinâmicas de dois sistemas de primeira ordem, através do uso de frações parciais. A constante de tempo dominante, neste caso, é dada pelo inverso do pólo mais lento (aquele mais próximo do eixo imaginário), sendo:

$$CT = \frac{1}{p_{lento}} = \frac{1}{2,296} = 0,4355$$

Com isso, levando-se em consideração a regra geral para escolha do tempo de amostragem sugerido em (GOMES DA SILVA JR., 2006), deve-se amostrar o sistema a uma taxa ao menos cinco vezes mais rápida que a constante de tempo dominante do sistema, sendo para tal, definido o tempo de amostragem padrão de  $T_{padrao} = 0,4355/5 = 0,0871$ .

As simulações a seguir mostram o comportamento temporal do sistema para os períodos de amostragem  $T_{padrao}$ ,  $4T_{padrao}$ ,  $8T_{padrao}$ ,  $12T_{padrao}$ ,  $16T_{padrao}$  e  $20T_{padrao}$ .

Pode ser observado analisando-se a Figura 17 que quanto menor o período de amostragem utilizado no sistema de controle amostrado, mais próximo ao desempenho do sistema de controle contínuo se torna a resposta temporal. Outra observação importante é que o desempenho do sistema começa a apresentar sinais de degradação (o sistema começa a apresentar máximo sobressaio, o que não é característica de sistemas que possuem somente pólos reais) a partir de  $T_{amostragem} \geq 12T_{padrao}$  o que nos evidencia que para muitos casos o critério de escolha adotado pode ser conservativo.

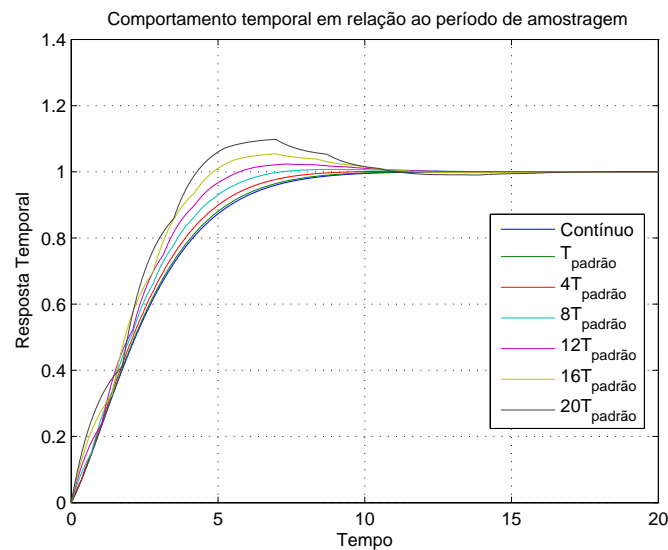


Figura 17: Desempenho do controle digital em função do período de amostragem

### 3.1.6 Novas metodologias de controle em rede

As metodologias de controle de um sistema de controle em rede têm por objetivo manter a estabilidade do sistema, controlando e mantendo o desempenho do mesmo tão bom quanto possível. Várias metodologias têm sido formuladas baseadas em muitos tipos de comportamento e configuração de redes em conjunto com diferentes maneiras de se tratar o problema do atraso. Algumas hipóteses são requeridas pelas abordagens estudadas, sendo:

- As transmissões da rede são livres de erro
- Todo pacote ou frame sempre possui o mesmo tamanho constante
- A diferença entre os tempos de amostragem do controlador e do sensor é constante
- O atraso computacional  $\tau^c$  é constante e é muito menor que o período de amostragem  $T$
- O tráfego na rede não pode ser sobrecarregado
- Toda dimensão da medida da saída ou do sinal de controle podem ser armazenados em um simples frame ou pacote.

#### 3.1.6.1 Metodologia do modelo determinístico aumentado de tempo discreto

Em (HALEVI, 1988) foi proposta uma metodologia chamada como Metodologia do Modelo Determinístico Aumentado de Tempo Discreto para controlar uma planta linear com um atraso de rede periódico. A estrutura do modelo aumentado discreto no tempo é direta e fácil. Adicionalmente, esta metodologia pode ser modificada para suportar períodos de amostragem não idênticos de um sensor e um controlador mencionados em (LIOU, 1990). A planta linear usada nesta metodologia tem a seguinte forma:

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

onde  $\Phi = e^{AT}$ ,  $\Gamma = \int_0^T e^{A\xi} d\xi B$  e  $\{A, B, C\}$  é a realização do sistema. Com o requisito do ponto de equilíbrio sendo zero, a dinâmica do controlador linear usado nesta metodologia pode ser descrita por:

$$\xi(k+1) = F\xi(k) - Gz(k) \quad (2)$$

$$u(k) = H\xi(k) - Jz(k)$$

onde  $\xi$  é o vetor de estados do controlador,  $z(k) = y(k-i)$ ,  $i = \{1, \dots, j\}$  é a medida passada no instante quando  $u(k)$  é processado pelo controlador e  $F$ ,  $G$ ,  $H$  e  $J$  são matrizes constantes descrevendo as dinâmicas do controlador. O sinal de controle  $u$  na equação (2) é a saída do controlador.

A idéia principal para se lidar com o atraso da rede nesta metodologia é combinar e rearranjar as equações (1) e (2) em um sistema de equações no espaço de estados aumentado como segue:

$$X(k+1) = \Omega(k+1)X(k) \quad (3)$$

onde  $X(k) = [x^T(k) \ y^T(k-1) \ \dots \ y^T(k-j) \ \xi^T(k) \ u^T(k-1) \ u^T(k-l)]^T$  é o vetor de estados aumentado e  $\Omega(k+1)$  é a matriz de transição de estados aumentada de  $\Phi$ ,  $\Gamma$ ,  $C$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$  e  $J$ .

Para atrasos periódicos, existe um inteiro positivo  $M$  tal que  $\tau_{k+M}^{sc} = \tau_k^{sc}$ . Usando esta propriedade, Halevi e Ray em (HALEVI, 1988) provaram que o sistema em (3) é assintoticamente estável se todos os autovalores de  $\Xi_k^M = \prod_{j=1}^M \Omega(k+M-j)$  estão contidos no círculo unitário.

### 3.1.6.2 Metodologia de filas

O mecanismo de filas pode ser usado para transformar atrasos de rede aleatórios em atrasos determinísticos de forma a fazer com que o Sistema de Controle em Rede se torne invariante no tempo. As metodologias que usam mecanismos de filas para controlar um sistema em rede são definidas aqui como metodologias de filas. Estas metodologias têm sido desenvolvidas pela utilização de algumas informações determinísticas e probabilísticas de um sistema de controle em rede para formulação de algoritmos de controle.

O início da metodologia de filas foi desenvolvido por Luck e Ray em (LUCK, 1990) e (LUCK, 1994) e denotado aqui como a metodologia de compensação de atraso baseado em predição determinística. Esta metodologia usa um observador para estimar os estados da planta e um preditor para computar o sinal de controle futuro baseado nas medidas das saídas passadas. O controle e as medidas das saídas passadas são armazenados em uma fila FIFO (First-In-First-Out) em registradores de deslocamento definidos como  $Q_1$  e  $Q_2$ , onde os tamanhos de  $Q_1$  e  $Q_2$  são respectivamente  $\mu$  e  $\theta$ , como mostrado na Figura 18.

Os passos para aplicação desta metodologia de compensação de atraso são listados como segue:

- Usando o conjunto de medidas passadas  $Z(k) = \{y(k-\phi), y(k-\phi-1), \dots\}$  em  $Q_2$ , onde  $\phi$  é o número de pacotes em  $Q_2$ , o observador estima o estado da planta  $\hat{x}(k-\theta+1)$
- O preditor usa  $\hat{x}(k-\theta+1)$  para estimar o estado futuro  $\hat{x}(k+\mu)$

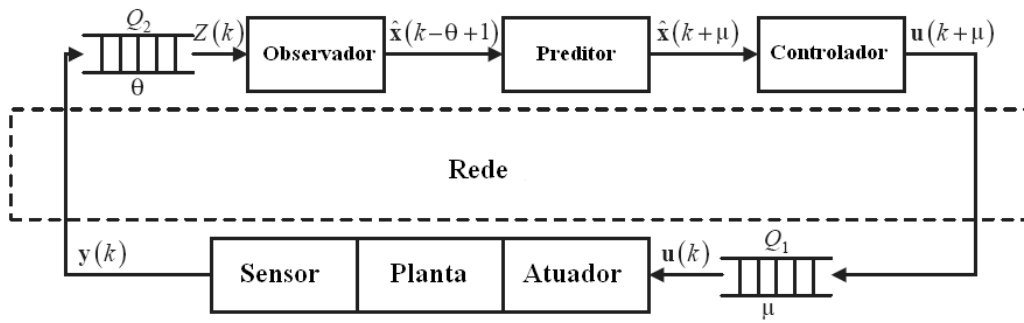


Figura 18: Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia de compensação de atraso baseado em previsão determinística)

- O controlador computa o sinal de controle futuro  $u(k + \mu)$  de  $\hat{x}(k + \mu)$  e depois envia  $u(k + \mu)$  para ser armazenado em  $Q_1$

Como o desempenho do observador e do preditor são altamente dependentes da precisão do modelo, o modelo dinâmico da planta deve ser bastante preciso.

Chan e Özgüner em (CHAN, 1995) desenvolveram outra metodologia de filas para controlar um Sistema de Controle em Rede sob atrasos de rede aleatórios. Esta metodologia, chamada aqui como metodologia de compensação de atraso baseada em previsão probabilística, utiliza informações probabilísticas juntamente com o número de pacotes na fila para melhorar a previsão do estado. Não obstante, esta metodologia de fila por si só não é realmente um algoritmo de controle, mas é mais como um esquema para prever variáveis de estado. A configuração do sistema de controle em rede nesta metodologia é ilustrado pela Figura 19.

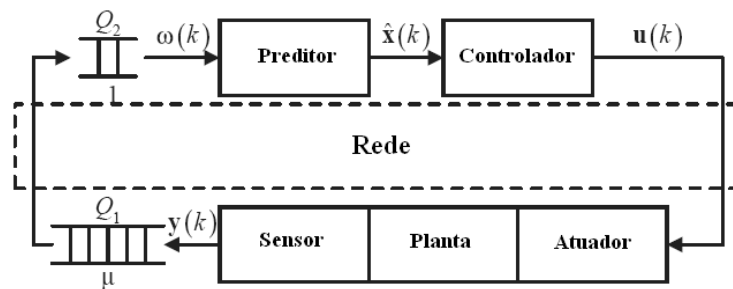


Figura 19: Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia de compensação de atraso baseado em previsão probabilística

Como mostrado na Figura 19, a fila  $Q_1$  no sensor tem uma capacidade de  $\mu$ , enquanto o registrador de deslocamento  $Q_2$  pode armazenar somente um pacote. A saída  $y(k)$  é armazenada em  $Q_1$  esperando para ser enviada para  $Q_2$  quando a rede estiver disponível para transmissão. Para descrever a metodologia de compensação, o número de pacotes armazenados em  $Q_1$  e na saída de  $Q_2$  são definidos como  $i$  e  $\omega(k)$ , respectivamente. No tempo de amostragem  $k$ , se o sensor não puder enviar  $y(k)$  antes que  $Q_2$  seja lido,  $\omega(k)$  é setado para o valor anterior  $\omega(k - 1)$ . De outra maneira,  $\omega(k)$  pode ser idêntico a qualquer valor em  $\{y(k), y(k - 1), \dots, y(k - \mu)\}$  (visto que a fila continua sendo atualizada à medida que o sensor envia o valor de saída  $y(k)$ , no caso onde a rede provoca atrasos maiores). Contudo, as possíveis escolhas de  $\omega(k)$  podem ser reduzidas para tanto  $y(k-i)$

ou  $y(k-i+1)$ , se  $i = 1, \dots, \mu$ , definido como índice de atraso, é conhecido. Esta condição requer que o valor de  $i$  deve ser anexado a cada pacote de  $y(k)$ . O preditor depois estima o valor corrente de  $\hat{x}(k)$  por:

$$\hat{x}(k) = P_0(\Phi^{i-1}\omega(k) + W_i) + P_1(\Phi^i\omega(k) + W_{i+1}) \quad (4)$$

$$W_i = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ [\Gamma, \Phi\Gamma, \dots, \Phi^{i-2}\Gamma] \cdot [u^T(k-1), u^T(k-2), \dots, u^T(k-i+1)]^T, & i \neq 1 \end{cases}$$

Onde  $P_0$  e  $P_1$  são matrizes de pesos. As matrizes de pesos são computadas das probabilidades de ocorrências de  $y(k-i)$  e  $y(k-i+1)$ . Estas equações requerem informação total dos estados (isto é,  $y(k)=x(k)$ ). Se a informação completa dos estados não está disponível, um observador pode também ser aplicado com pequenas modificações. Com os estados preditos, uma lei de controle, entre vários algoritmos de controle, pode ser aplicada nesta metodologia.

### 3.1.6.3 Metodologia do controle estocástico ótimo

Nilsson em (NILSSON, 1998) propôs a metodologia do controle ótimo estocástico para controlar um sistema de controle em rede sob efeito de atrasos randômicos. A metodologia do controle ótimo estocástico trata os efeitos dos atrasos aleatórios da rede em um sistema de controle em rede como um problema LQG (Linear-Quadratic-Gaussian). Além das hipóteses mencionadas antes, esta metodologia assume que  $\tau < T$ . A dinâmica de uma planta de um sistema remoto nesta metodologia é descrita por:

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma_0(\tau_k)u(k) + \Gamma_1(\tau_k)u(k-1) + v(k) \quad (5)$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k)$$

onde  $\tau_k = [\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}]^T$  indica atrasos de transporte no tempo de amostragem  $k$ ,  $\Phi = e^{AT}$ ,  $\Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{T-\tau_k^{sc}-\tau_k^{ca}} e^{A\xi} d\xi B$ , e  $\Gamma_1(\tau_k) = \int_{T-\tau_k^{sc}-\tau_k^{ca}}^T e^{A\xi} d\xi B$ . O processo estocástico  $v(k)$  e  $w(k)$  são ruídos brancos Gaussianos não correlacionados com média zero. Estas equações são modificações dos sistemas de atrasos constantes (ASTRÖM, 1990).

O objetivo da metodologia de controle ótimo estocástico é minimizar a seguinte função de custo no caso em que as informações de todos estados estão disponíveis:

$$J(k) = E[x^T(N)Q_N x(N)] + E \left[ \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \right] \quad (6)$$

onde  $E[.]$  é a esperança matemática, e  $Q_N$  e  $Q$  são matrizes de pesos. A lei de controle para a realimentação de estados ótima é encontrada através de programação dinâmica e é descrita como:

$$-L(k, \tau_k) \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sendo  $L$  a matriz de ganho ótimo depois de resolvido o problema LQG formulado. O atraso da rede  $\tau_k$  é assumido ser independente das demais variáveis do processo. As informações passadas do atraso são necessárias. Se as informações completas dos estados não estão disponíveis, um estimador ótimo como filtro de Kalman pode ser aplicado para (7). Não obstante, este caso requer informações passadas da saída e entrada

$\{y(0), \dots, y(k), u(0), \dots, u(k-1)\}$  em conjunto com as informações passadas do atraso. Outra lei de controle para ser usada com atrasos modelados por Cadeia de Markov é também derivada do mesmo estudo. Baseado em (6), a metodologia de controle ótimo estocástico tem mostrado melhor performance que a metodologia de compensação de atraso baseada em predição determinística.

#### 3.1.6.4 Metodologia da perturbação

Nesta metodologia usou-se teoria de perturbação e teoria não linear para formulação dos efeitos do atraso na rede em um sistema de controle em rede como uma perturbação de um sistema contínuo no tempo sob a hipótese que não existem ruídos de observação. Esta metodologia, denotada aqui como metodologia da perturbação, pode ser aplicada sobre um sistema de controle em rede com atrasos de rede periódicos e randômicos na transmissão sensor-para-controlador. Contudo, estas redes são restritas a serem redes baseadas em prioridades, as quais podem estabelecer diferentes prioridades para as transmissões de dados. Estas prioridades podem ser gerenciadas por algoritmos de escalonamento de prioridades. Adicionalmente, esta metodologia requer uma alta taxa de amostragem para que o sistema de controle em rede possa se aproximar de um sistema contínuo. Uma malha de controle na metodologia da perturbação consiste de um controlador não linear e uma planta não linear, mas a análise e derivações usadas podem ser similarmente aplicadas para sistemas lineares como descrito em (WALSH, 2002). A Figura 20 mostra o diagrama em blocos do sistema de controle em rede nesta metodologia.

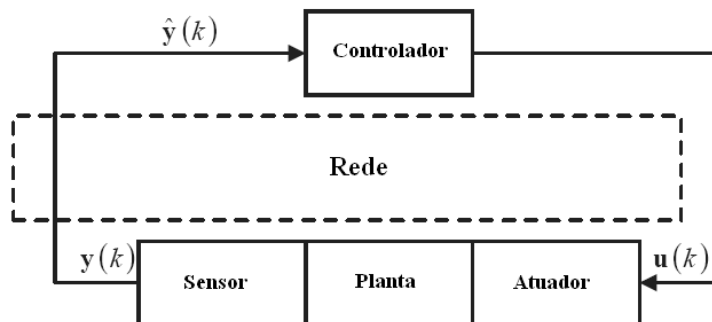


Figura 20: Configuração de um Sistema de Controle em Rede na metodologia da perturbação

A dinâmica do sistema de controle em rede na metodologia da perturbação é representada por:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), e(t), t) \quad (8)$$

onde  $x(t) = [x_p^T(t), x_c^T(t)]^T$  é o vetor de estados aumentado contendo o vetor de estados da planta  $x_p(t)$  e o vetor de estados do controlador  $x_c(t)$ . O erro do sistema de controle em rede é descrito por:

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (9)$$

onde  $y(t)$  é a saída da planta e  $\hat{y}(t) \equiv y(t - \tau^{sc})$  é a saída mais atual recebida pelo controlador. Também  $e(t)$  é assumido ter a seguinte dinâmica,

$$\dot{e}(t) = g(t, x(t), e(t)) \quad (10)$$



A equação dinâmica (10) é tratada como uma perturbação a desaparecer, onde o objetivo é determinar um atraso limite  $\rho$  tal que o sistema de controle em rede permaneça estável se  $\tau^{sc} < \rho$ .

### 3.1.6.5 Metodologia do escalonamento de tempo de amostragem

Esta metodologia foi desenvolvida para selecionar apropriadamente um período de amostragem para o sistema de controle em rede, tal que os atrasos na rede não afetem significativamente o desempenho do sistema e o sistema de controle em rede permaneça estável. Esta metodologia é utilizada originalmente para múltiplos sistemas de controle em rede sobre uma rede de atrasos periódicos, nas quais todas conexões de cada sistema de controle pela rede são bem conhecidas. Contudo, esta metodologia foi também modificada para ser aplicada em redes com atrasos aleatórios tal como abordado em (HONG, 2000). Esta metodologia requer  $\tau < T$  e é aplicável somente para um sistema de controle em rede de dimensão simples. Na metodologia de escalonamento de tempo de amostragem, o número de sistemas de controle em rede sobre a rede é  $M$ . Os tempos de amostragem de todos  $M$  sistemas de controle sobre a rede são calculados levando-se em consideração o tempo de amostragem do sistema de controle em rede mais sensível e baseados na análise no domínio da frequência sobre seu pior caso do limite de atraso. O sistema de controle em rede mais sensível, denotado como  $SCR_1$ , tem o menor limite de atraso definido como  $\phi_1$ . O algoritmo de escalonamento de tempo de amostragem é formulado através do conceito de janela ilustrado na Figura 21, onde  $L$  e  $\sigma$  são os períodos de transmissão de uma mensagem puramente de dados e seu overhead, respectivamente;  $T_1$  é o tempo de amostragem do  $SCR_1$ , e  $r$  é o número de mensagens de dados que podem ser servidas pela rede durante o pior caso de tráfego. O tempo de amostragem  $T_1$  é computado como:

$$T_1 = \frac{\phi_1 + L}{3} \quad (11)$$

De modo a achar os tempos de amostragem de outros sistemas de controle sobre a mesma rede, estes sistemas devem ser indexados do pior caso de limite de atraso dos sistemas em uma ordem ascendente como  $SCR_2, SCR_3, \dots, SCR_M$ . Por exemplo o  $SCR_2$  tem seu pior caso de limite de atraso maior que o pior caso do limite de atraso do  $SCR_1$ , mas é menor que o pior caso do limite de atraso do  $SCR_3$ . Os tempos de amostragem de  $SCR_2, SCR_3, \dots, SCR_M$  são determinados através de  $T_1$  usando-se diferentes regras com respeito à diferentes condições da rede.

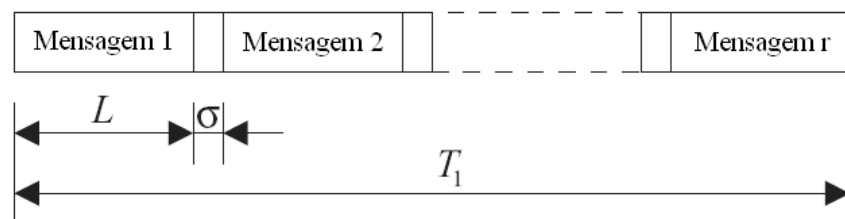


Figura 21: Janela de transmissões de dados dentro do período de amostragem  $T_1$  da metodologia de escalonamento de tempo de amostragem

Em um caso geral, todos os tempos de amostragem são múltiplos de  $T_1$  como expressados por,

$$T_i = k_i T_1, \quad i=2, 3, 4, \dots, M,$$

$$k_i = \Lambda \left[ \frac{\varphi_i - (T_1 - L)}{2T_1} \right] \quad (12)$$

onde  $T_i$  é o tempo de amostragem do  $SCR_i$ , e  $a = \Lambda(b)$  indica que  $a = 2^{vi}$ ,  $vi \in \{0, 1, 2, \dots\}$ , o qual é o "mais próximo", mas não excede  $b$ .

Em um caso especial, no qual o número de sistemas de controle e outras fontes conectadas na mesma rede é menor que  $r$ , os tempos de amostragem de  $SCR_2, \dots, SCR_M$  são determinados por:

$$T_i = \frac{\varphi_i - (T_1 - L)}{2} \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (13)$$

Adicionalmente, a otimalidade da utilização da rede pode ser alcançada por esta metodologia, apresentando uma vantagem entre outras metodologias. A condição de otimalidade é:

$$2 \sum_{i=1}^M \frac{T_1}{T_i} = r \quad (14)$$

Kim, Kwon e Park em (KIM, 1996) e (KIM, 1998) melhoraram o conceito de escalonamento de tempo de amostragem para desenvolver um outro algoritmo para sistemas de controle em rede multidimensionais. Neste trabalho, o limite de atraso de cada sistema é obtido através de diferentes critérios de estabilidade. A dinâmica de tal sistema de controle em rede multi-dimensional é brevemente expressa como:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t - \tau^{sc}) + A_2x(t - \tau^{sc} - \tau^c) + A_3x(t - \tau^{ca} - \tau^c) \quad (15)$$

onde  $x(t) = [x_p^T(t) \quad x_c^T(t)]^T$ ,  $x_p(t)$  é o vetor de estados da planta,  $x_c(t)$  é o vetor de estados do controlador. As matrizes  $A$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são calculadas através das realizações da planta e do controlador. Dois critérios de estabilidade assintótica existentes, baseados em funções de Lyapunov podem ser usados para achar o limite do atraso nesta metodologia generalizada.

### 3.1.6.6 Metodologia do controle robusto

Göktas em (GÖKTAS, 2000) desenvolveu um controlador em rede no domínio da frequência usando teoria de controle robusto. A maior vantagem desta metodologia é que ela não requer a priori informações sobre distribuições de probabilidade dos atrasos na rede. Nesta metodologia, os atrasos da rede  $\tau^{ca}$  e  $\tau^{sc}$  são modelados como perturbações multiplicativas simultâneas. Ambos atrasos  $\tau^{ca}$  e  $\tau^{sc}$  são considerados limitados e podem ser aproximados pelo modelo de fluxo de fluídos (FILIPIAK, 1988). A formulação do atraso na rede é descrito a seguir:

$$\tau^n = \frac{1}{2}(\tau_{max} - \tau_{min}) + \frac{1}{2}(\tau_{max} - \tau_{min})\delta, \quad -1 \leq \delta \leq 1 \quad (16)$$

$$\tau^n = (1 - \alpha)\tau_{max} + \alpha\tau_{max}\delta, \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}$$

onde  $\tau^n$  pode ser  $\tau^{ca}$  e  $\tau^{sc}$ ,  $\tau_{max}$  é o limite superior de  $\tau^n$ ,  $\tau_{min}$  é o limite inferior de  $\tau^n$ ,  $\alpha$  e  $\delta$  são números reais para serem determinados baseados em uma aplicação. O

primeiro termo em (16) representa um atraso constante, o segundo termo representa um atraso incerto variando em relação ao primeiro termo. O atraso em (16) é convertido para o uso no domínio da frequência, e aproximado pela aproximação de Padé de primeira ordem como:

$$e^{-\tau^n s} = e^{-s(1-\alpha)\tau_{max}} e^{-s\alpha\tau_{max}\delta} \approx \frac{1 - \frac{s\tau^n}{2}}{1 + \frac{s\tau^n}{2}} \approx \left[ \frac{1 - \frac{s(1-\alpha)\tau_{max}}{2}}{1 + \frac{s(1-\alpha)\tau_{max}}{2}} \right] \cdot \left[ \frac{1 - \frac{s\alpha\tau_{max}\delta}{2}}{1 + \frac{s\alpha\tau_{max}\delta}{2}} \right] \quad (17)$$

A parte incerta do atraso é depois tratada como uma perturbação multiplicativa simultânea expressa como:

$$\frac{1 - \frac{s\alpha\tau_{max}\delta}{2}}{1 + \frac{s\alpha\tau_{max}\delta}{2}} = 1 + W_m(s)\Delta \quad (18)$$

onde  $\Delta$  é a função de perturbação e:

$$W_m(s) = \frac{\alpha\tau_{max}s}{1 + \frac{\alpha\tau_{max}s}{3,465}} \quad (19)$$

é um peso de incerteza multiplicativa que cobre o atraso incerto. O fator 3,465 é selecionado baseado na preferência do designer. Esta formulação é depois colocada em uma estrutura  $H_\infty$  e o conceito de  $\mu$ -síntese é usado para o desenvolvimento de um controlador de tempo contínuo  $G_c(s)$  para uma planta  $G_p(s)$ . A malha de controle na metodologia de controle robusto que usa esta formulação é mostrada na Figura 22, onde  $R(s)$ ,  $U(s)$ ,  $Y(s)$ , e  $E(s) = R(s) - Y(s)$  são os sinais de referência, controle, saída e erro no domínio da frequência respectivamente.

O controlador é discretizado fazendo uso da transformação bi-linear sobre uma rede atual. O autor também sugere uma abordagem para aplicação da metodologia de controle robusto com Qualidade-de-Serviço de rede em uma rede ATM de modo a atingir o máximo erro tolerável em uma aplicação de robôs móveis.

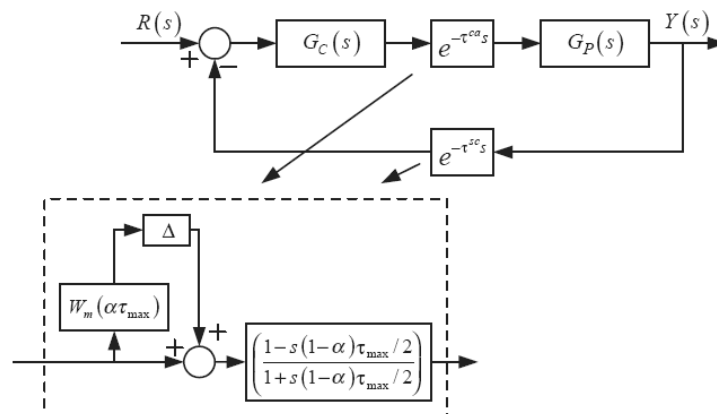


Figura 22: Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia de controle robusto

### 3.1.6.7 Metodologia baseada em modulação em lógica fuzzy

Almutairi em (ALMUTAIRI, 2001) propôs uma metodologia baseada em modulação em lógica fuzzy para um sistema de controle em rede com uma planta linear e um controlador PI modulado para compensar os efeitos dos atrasos na rede baseados em lógica fuzzy (ZADEH, 1973). Nesta metodologia, os ganhos do controlador PI são externamente atualizados na saída do controlador baseando-se no erro da saída do sistema ocasionado pelos atrasos na rede, com isso, o controlador PI não precisa ser novamente desenvolvido, modificado ou interrompido para uso em um ambiente de rede. Um problema de controle de velocidade de um motor DC é usado para ilustrar a metodologia exposta. A configuração do sistema na metodologia baseada em modulação em lógica fuzzy é mostrada na Figura 23, onde  $r(t)$ ,  $e(t)$  e  $y(t)$  são a referência, erro e a saída do sistema. A saída do controlador PI é definida como  $u_{PI}(t)$  e a saída do controlador PI modificado pela modulação baseada em lógica fuzzy é definida como  $u_C(t)$ . A metodologia baseada em modulação em lógica fuzzy pode ser implementada em uma unidade chamada de modulador lógico fuzzy, o qual modifica o controle  $u_{PI}(t)$  da seguinte maneira:

$$u_C(t) = \beta u_{PI}(t) = \beta K_p e(t) + \beta K_i \int_{t_0}^t e(\xi) d\xi \quad (20)$$

O fator multiplicativo  $\beta$  é usado para ajustar externamente os ganhos do controlador na saída sem interromper o controlador PI original. O valor de  $\beta$  é selecionado de duas regras fuzzy baseadas nos efeitos dos atrasos na rede como segue:

$$\begin{aligned} \text{Se } e(t) \text{ é PEQUENO, então } \beta &= \beta_1 \\ \text{Se } e(t) \text{ é GRANDE, então } \beta &= \beta_2 \end{aligned}$$

Onde  $0 < \beta_1 < \beta_2 < 1$ . As funções de pertinência de  $e(t)$  são mostradas na Figura 24, onde  $\mu_{SMALL}$  e  $\mu_{LARGE}$  são as funções de pertinência que representam os graus de inclusão para uma variável lingüística SMALL e LARGE respectivamente,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são fatores de ajuste que dão forma às funções de pertinência. As formas das funções de pertinência e os valores  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são finamente ajustados por uma otimização on-line e off-line fazendo uso de um algoritmo baseado em funções de custo.

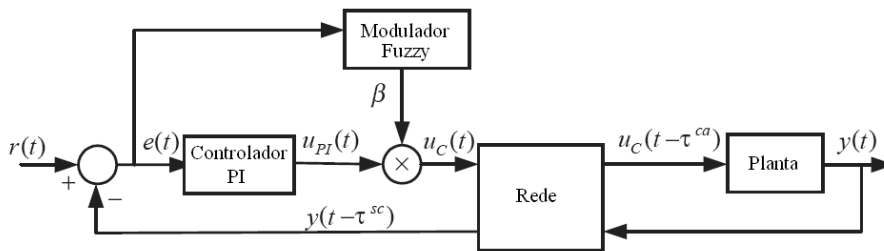


Figura 23: Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia baseada em modulação em lógica fuzzy

As funções de custo para otimização on-line são:

$$J(k) = e^2(k) \quad (21)$$

$$J(k) = \sum_{i=k-m}^k e^2(i) \quad (22)$$

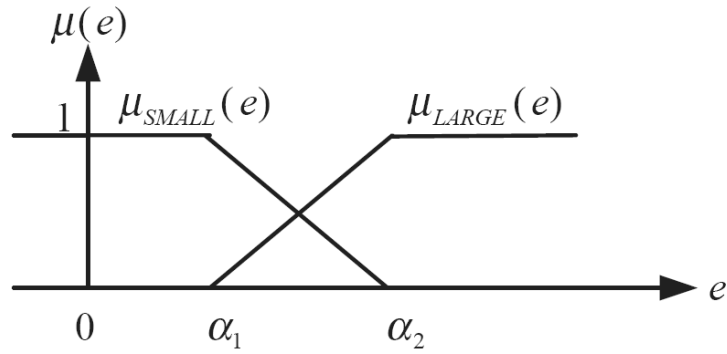


Figura 24: Função de pertinência de  $e(t)$

onde os custos (21) e (22) indicam o erro instantâneo e a somatória do erro avaliado através de uma janela móvel de tamanho  $m$ . De outra forma, a otimização off-line usa diferentes funções de custo como segue:

$$J = \lambda J_1 + (1 - \lambda) J_2 \quad (23)$$

onde:

$$J_1(p) = \frac{\sum_{k=0}^N e(k)^2}{|J_1(p)|_\infty} \quad (24)$$

$$J_2(p) = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta e_b(i)^2}{|J_2(p)|_\infty} \quad (25)$$

e  $\{\Delta e_b(i)\} = \{\Delta e(k) | e(k) \cdot \Delta e(k) > 0\}$ . O custo  $J_1$  adiciona uma penalidade sobre o tempo de resposta do sistema e a pouca convergência; o custo  $J_2$  dá uma penalidade extra sobre o máximo sobrepasso do sistema e comportamentos oscilatórios e  $\lambda$  é um fator de peso. O vetor de parâmetros  $p$  representa os parâmetros da função de pertinência  $\beta_1$  e  $\beta_2$ .

### 3.1.6.8 Metodologia baseada em eventos

Tarn e Xi em (TARN, 1998) introduziram a metodologia baseada em eventos para controle em rede de um manipulador robótico através da Internet. Esta metodologia foi originalmente desenvolvida para a estrutura hierárquica, mas pode ser aplicada para estrutura direta da mesma forma. O conceito da metodologia baseada em eventos é muito diferente das outras metodologias vistas previamente. Ao invés do uso do tempo, esta metodologia usa um movimento do sistema como a referência do sistema. A referência móvel definida como 's' pode ser, por exemplo, a distância viajada por um sensor fim de curso de um manipulador robótico. A referência móvel 's' deve ser uma função não decrescente do tempo de forma a garantir a estabilidade do sistema. A configuração do sistema de controle em rede na metodologia baseada em eventos é mostrada a seguir através da Figura 25.

A medida da saída  $y(t)$  enviada através da rede é usada como uma entrada para o mapeamento da referência móvel. O mapeamento converte  $y(t)$  para uma referência móvel 's', a qual é depois usada como entrada para um planejador para o cálculo da referência  $r(s)$ . Com isso,  $r(s)$  se torna função de  $y(t)$ , e é atualizado em tempo-real para compensar todos os distúrbios e eventos inesperados incluindo atrasos na rede. Devido todo o sistema não ser baseado no tempo, os atrasos na rede não desestabilizarão o sistema.

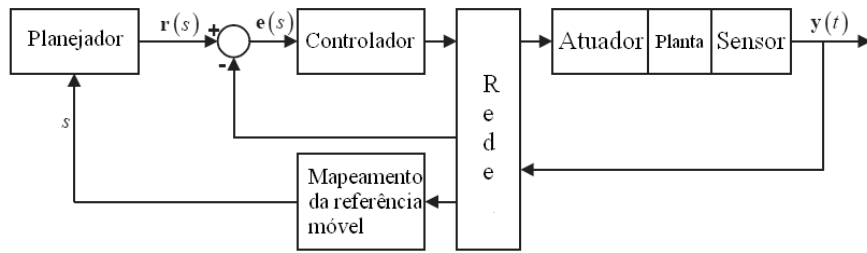


Figura 25: Configuração de um sistema de controle em rede na metodologia baseada em eventos

### 3.1.6.9 Metodologia baseada em adaptação do controle do usuário final

Tipsuwan e Chow em (TIPSUWAN, 2001) propuseram a metodologia baseada em adaptação do controle do usuário final. O conceito central desta metodologia é adaptar os parâmetros do controlador (por exemplo os ganhos do controlador) com respeito às condições correntes do tráfego na rede ou a QoS (Qualidade de Serviço) atual da rede. Nesta metodologia, o controlador e o sistema remoto são assumidos ter a capacidade de medir as condições de tráfego da rede. A medida das condições de tráfego neste caso pode ser feita através de middleware (LI, 1999). A metodologia baseada em adaptação do controle do usuário final é originalmente desenvolvida para cooperar com o esquema de negociação de QoS de tempo-real (ABDELZAHER, 2000), no qual o controlador pode requerer e atualizar os requisitos de QoS da rede através da própria rede. Se a QoS desejada não puder ser alcançada, o controlador adaptará os parâmetros para atingir a melhor performance possível. Os parâmetros são ótimos com respeito à condição atual do tráfego. Uma aplicação usada para demonstrar a metodologia é um sistema de controle de velocidade de um motor DC através de um link de rede com atrasos randômicos. A velocidade do motor DC é controlada através de um controlador PI, e os parâmetros adaptados são o ganho proporcional  $K_p$  e o ganho integral  $K_i$ . O desempenho do sistema é medido através do uso da média quadrática do erro como é mostrado a seguir:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |r(k) - y(k)|^2 \quad (26)$$

A medida da QoS da rede usada neste caso é definida como  $QoS^n = [QoS_1, QoS_2]^T$ , onde  $n$  é o índice para indicar a condição de QoS, sendo:

- $QoS_1$ : vazão da rede ponto-a-ponto
- $QoS_2$ : máximo limite do atraso ponto-a-ponto do maior pacote

Os parâmetros ótimos do controlador com respeito aos ganhos do controlador sob diferentes  $QoS^{(n)}$  são pré-computados por simulações e armazenados em uma tabela. Os ganhos do controlador serão atualizados quando as condições de tráfego da rede mudarem. Um exemplo da superfície de custo de (26) com respeito aos ganhos do controlador PI é mostrado na Figura 26.

É ilustrado o desempenho da metodologia baseada em adaptação do controle do usuário final deixando as condições da rede mudar de  $QoS^{(1)} = [38400bps, 5ms]$  para  $QoS^{(2)} = [19200bps, 8ms]$  quando a referência muda de 200 [rad/s] para 300 [rad/s] em  $t = 3.5$  [s].

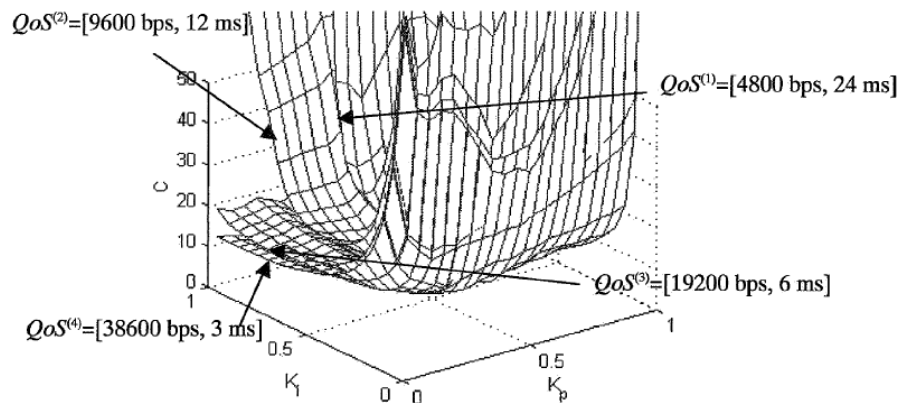


Figura 26: Superfície de custo com respeito aos ganhos do controlador sob diferentes condições de QoS

A resposta ao degrau do sistema de controle de velocidade do motor DC é mostrado na Figura 27.

Como pode ser observado na Figura 27, a seguir, o sistema de controle de velocidade de um motor DC em rede com adaptação dos ganhos de controle apresenta melhor desempenho que o sistema de controle sem a adaptação como é indicado pelo menor sobrepasso. A metodologia baseada em adaptação dos ganhos de controle do usuário final pode também ser aplicada para estruturas hierárquicas como mostrado em (TIPSUWAN, 2002).

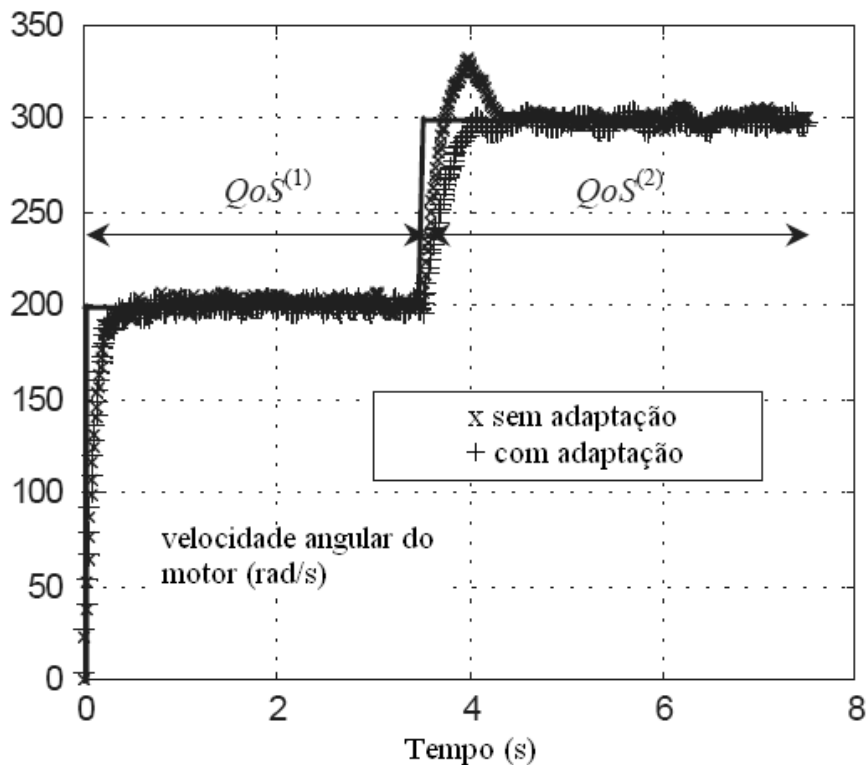


Figura 27: Resposta ao degrau de um sistema de controle de velocidade de um motor DC na metodologia baseada em adaptação do controle do usuário final; x: sem adaptação, +:com adaptação

## 3.2 Escalonamento

### 3.2.1 Teoria de escalonamento de sistemas de tempo real

A teoria de escalonamento de sistemas de tempo real é usada para prever se as tarefas em um sistema de tempo real irão cumprir os requisitos individuais de tempo. Dado um modelo de tarefa e um algoritmo de escalonamento, uma análise offline é executada para checagem, por exemplo, se todas deadlines serão cumpridas durante o tempo de operação. Duas principais abordagens de desenvolvimento existem: o escalonamento estático e o escalonamento dinâmico. O escalonamento estático é uma abordagem "offline" que usa otimização baseada em algoritmos onde são atribuídos parâmetros fixos para prioridades das tarefas em tempo de projeto, para gerar um ciclo de execução (FARINES, 2000). Uma tabela de execução estabelece a ordem nas quais as diferentes tarefas devem ser executadas e por quanto tempo elas devem executar. Uma vantagem do ciclo de execução é sua facilidade de implementação. A abordagem também apresenta muitos efeitos indesejados (LOCKE, 1992). Primeiramente, existe a dificuldade de se fazer o escalonamento por si só. Segundo, é difícil a incorporação de tarefas esporádicas e aperiódicas. Terceiro, tarefas com tempos de execução longos podem ter que ser divididas em muitos "pedaços" pequenos, tornando o código susceptível a erros e de difícil leitura. Quarto, tabelas muito longas podem ser necessárias se o escalonamento incorporar tarefas com tempos de período que são relativamente prioritários. O escalonamento dinâmico adota algoritmos onde são especificados parâmetros que variam em tempo de execução com a evolução do sistema e as prioridades são re-calculadas durante a execução das tarefas (GOOSSENS, 2004). Existe um grande número de políticas de escalonamentos estático e dinâmico e serão abordadas neste trabalho principalmente as políticas de escalonamento de prioridades fixas (escalonamento estático) e as de menor deadline primeiro (escalonamento dinâmico), ambas introduzidas no paper do seminário (LIU, 1973). Na análise do escalonamento é assumido um modelo básico de tarefa, onde cada tarefa  $\tau_i$  é descrita por:

- Um período  $T_i$
- Uma deadline relativa  $D_i$
- Um tempo de execução (pior caso)  $C_i$

Mais adiante, no caso mais simples, é assumido que as tarefas sejam independentes (isto é, elas não comunicam ou dividem outras fontes além da CPU) e não existe overhead do kernel.

### 3.2.2 Escalonamento de prioridade fixa

O escalonamento de prioridade fixa (fixed priority scheduling) é a mais comum política de escalonamento e é suportada pela maioria dos sistemas operacionais comerciais de tempo real. Sob o escalonamento de prioridades fixas, para cada tarefa  $\tau_i$  é estabelecida uma prioridade fixa  $P_i$ . Se muitas tarefas estão prontas para serem executadas ao mesmo tempo, a tarefa com a maior prioridade ganha o acesso a CPU. Se uma tarefa com maior prioridade que outra que está rodando deveria se tornar ativa, a tarefa em execução é interrompida pela tarefa de maior prioridade.

#### 3.2.2.1 Estabelecimento das prioridades

O projeto do escalonamento de prioridades fixas consiste no estabelecimento das prioridades para todas tarefas antes da execução. Em (LIU, 1973) foi mostrado que o esta-



belecimento de prioridade por Rate-Monotonic (RM) é ótimo quando  $D_i = T_i$  para todas as tarefas. A cada tarefa é estabelecida uma prioridade baseada no seu período, quanto menor o período, maior a prioridade. O esquema é ótimo no sentido em que se o conjunto de tarefas não é escalonável sob o método de escalonamento rate monotonic, ele não será escalonável sob nenhum outro método de escalonamento por prioridades fixas. Pelo escalonamento rate monotonic, entenda-se escalonamento por prioridades fixas onde as tarefas têm associadas prioridades rate monotonic.

Em muitos casos, é desejável especificar deadlines que sejam menores que o período. No caso onde  $D_i \leq T_i$  para todas as tarefas, o escalonamento por deadline monotonic (DM) é ótimo (no mesmo sentido abordado acima) (LEUNG, 1982). A cada tarefa é estabelecida uma prioridade baseada na sua deadline, quanto menor a deadline, maior a prioridade. Note que o escalonamento por RM é meramente um caso especial do escalonamento por DM.

### 3.2.2.2 Análise do escalonamento

Dado um conjunto de tarefas com atributos conhecidos (períodos, deadlines, tempos de execução e prioridades), um número de diferentes testes pode ser aplicado para checar se todas as tarefas irão cumprir suas deadlines. Assumindo o escalonamento de prioridades rate monotonic, um teste de escalonabilidade suficiente (mas não necessário) é obtido considerando-se a utilização do conjunto de tarefas (LIU, 1973). Assumindo um conjunto de  $n$  tarefas, todas as tarefas irão cumprir suas deadlines se:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq n(2^{\frac{1}{n}} - 1) \quad (27)$$

Como o número de tarefas se torna grande, o limite da utilização alcança  $\ln(2) = 0,693$ .

Um teste de escalonamento exato sob escalonamento de prioridades fixas (FP) é executado computando-se o pior caso do tempo de resposta  $R_i$  de cada tarefa (JOSEPH, 1986). O tempo de resposta de uma tarefa é definido como o tempo que compreende desde sua liberação (release) até seu término. O máximo tempo de resposta de uma tarefa ocorre quando todas as outras tarefas são liberadas simultaneamente. O pior caso do tempo de resposta de uma tarefa  $\tau_i$  é dado por sua equação recursiva:

$$R_i = C_i + \sum_{j \in hp(i)} \left\lceil \frac{R_j}{T_j} \right\rceil C_j \quad (28)$$

onde  $hp(i)$  é o conjunto de tarefas com maior prioridade que  $\tau_i$  e  $\lceil x \rceil$  denota a função máximo superior. O conjunto de tarefas é escalonável se e somente se  $R_i \leq T_i$  para todas as tarefas.

### 3.2.2.3 Extensões

Muitas extensões para a teoria de escalonamento por prioridades fixas existem, e. g., (KLEIN, 1993). A análise tem sido estendida para lidar, por exemplo, com fontes comuns, jitter de liberação, tempos de chaveamento de contexto não nulos e interrupções do clock. A análise atrás das condições de escalonamento é baseada na noção de instante crítico. Esta é a situação quando todas as tarefas são liberadas simultaneamente. Se o conjunto de tarefas é escalonável para o pior caso, será escalonável também para todos os outros casos. Em muitos casos, esta hipótese é desnecessariamente restritiva. Tarefas podem

ter restrições precedentes que as impossibilitem de chegar ao mesmo tempo. Para tarefas independentes é possível algumas vezes introduzir offsets de liberação, para evitar as liberações simultâneas. Se liberações simultâneas podem ser evitadas, o escalonamento do conjunto de tarefas pode aumentar (AUDSLEY, 1993). Fórmulas para os cálculos do tempo de resposta para tarefas com offsets de liberação estática são dadas em (REDELL, 2002a). A análise da escalonabilidade para tarefas com offsets dinâmicos é discutida em (GUTIERREZ, 1998). Um número de modelos alternativos de escalonamento baseados na serialização das execuções das tarefas de diferentes maneiras têm sido sugerido. Dentre estes inclui-se o modelo multiframe (BARUAH, 1999) e o modelo de subtarefa executada serialmente (HARBOUR, 1994).

Recentemente, fórmulas para o melhor caso do tempo de resposta das tarefas sob escalonamento de prioridades fixas têm sido derivadas (REDELL, 2002b). Conhecendo-se ambos, o melhor caso e o pior caso do tempo de resposta das tarefas, dá-se uma medida do jitter do tempo de resposta. Em sua forma mais simples, o melhor caso do tempo de resposta  $R_i^b$  da tarefa  $\tau_i$  é dada pela equação recursiva:

$$R_i^b = C_i^b + \sum_{j \in hp(i)} \left\lceil \frac{R_i^b - T_j}{T_j} \right\rceil C_j^b \quad (29)$$

onde  $C_i^b$  denota o melhor caso do tempo de execução da tarefa  $\tau_i$ .

### 3.2.3 Escalonamento por menor deadline primeiro (Earliest deadline first scheduling - EDF)

Sob o escalonamento por menor deadline primeiro (earliest deadline first-EDF), a tarefa com o menor tempo para sua deadline é escolhida para execução. A deadline absoluta de uma tarefa pode com isso ser interpretada como uma prioridade dinâmica. Devido sua natureza mais dinâmica, o EDF pode escalonar um conjunto maior de grupos de tarefas em relação às políticas de escalonamento de prioridades fixas. Apesar de suas vantagens teóricas, o EDF tem sido usado principalmente em sistemas operacionais de tempo real experimentais. Uma razão para isto pode ser que o EDF também tem um número de efeitos indesejados potenciais comparados ao escalonamento por prioridades fixas (BURNS, 2001):

- A implementação do EDF é um pouco mais complexa; a prioridade dinâmica acarreta um maior overhead de execução e requer maior armazenamento
- Pode ser difícil de se estabelecer deadlines artificiais para tarefas que não tem deadlines explícitas
- Durante sobrecargas, todas as tarefas tendem a perder suas deadlines (isto é conhecido como efeito dominó)

Os argumentos acima não devem ser tratados como verdades absolutas. Pode ser argumentado que é mais difícil se estabelecer prioridades significativas que deadlines em um sistema de tempo real. As execuções de tarefas de controle sob o escalonamento EDF realmente tendem a se comportar melhor em situações de sobrecarga que sob escalonamento de prioridades fixas.

### 3.2.3.1 Análise do escalonamento

No caso onde  $D_i = T_i$  para todas as tarefas, a escalonabilidade de um conjunto de tarefas sob EDF é exatamente determinado pela utilização do processador (LIU, 1973). Todas tarefas cumprirão suas deadlines se e somente se:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq 1 \quad (30)$$

Note que este teste é muito mais simples que o teste de escalonamento exato sob o escalonamento de prioridades fixas (o qual requer que os tempos de resposta sejam computados). Note também que o processador pode ser completamente utilizado sob o EDF. Para o caso  $D_i \leq T_i$ , a análise se torna mais difícil. Um teste de escalonabilidade bastante geral sob EDF envolve a computação do fator de carga das tarefas, o que pode ser constatado em (STANKOVIC, 2005). A análise é realizada como mostrado a seguir. Dado um conjunto arbitrário de tarefas, cada trabalho (tarefa)  $j_k$  deve ser descrito por um tempo de computação  $C_k$ , um tempo de liberação  $r_k$ , e um deadline absoluto  $d_k$ . A demanda do processador pelo conjunto de tarefas deve ser definida sobre um intervalo de tempo  $[t_1, t_2]$  como:

$$h[t_1, t_2] = \sum_{r_k \geq t_1 \wedge d_k \leq t_2} C_k \quad (31)$$

Depois, o fator de carga das tarefas  $u$  deve ser definido como:

$$u = \max_{0 \leq t_1 \leq t_2} \frac{h[t_1, t_2]}{t_2 - t_1} \quad (32)$$

onde a maximização é realizada sobre todos os intervalos de tempo possíveis. O conjunto de tarefas é escalonável sob EDF se e somente se  $u \leq 1$ .

### 3.2.3.2 Análise do tempo de resposta

O pior caso da análise do tempo de resposta sob o escalonamento EDF é mais difícil que sob o escalonamento por prioridades fixas. O principal problema é que não existe um caso crítico bem definido no qual a tarefa experimentalizará uma interferência máxima. Não obstante, fórmulas têm sido derivadas por cálculos do tempo de resposta sob EDF, como pode ser observado em (STANKOVIC, 2005).

## 3.2.4 Escalonamento baseado em servidores de controle

Muitos tipos de tarefas não se enquadram no modelo de tarefa periódica simples. Entre elas estão incluídas as tarefas aperiódicas e tarefas com deadline maleável (soft real time). Para manter a garantia das tarefas com deadlines rígidas (hard real time), estes tipos de tarefas podem ser incorporados em um sistema de tempo real usando-se servidores. A principal idéia de um escalonamento baseado em servidores é ter uma tarefa especial, o servidor, para o escalonamento da carga de trabalho aperiódica pendente (emanada de uma ou várias tarefas aperiódicas). O servidor tem um "orçamento" que é usado para escalonar e executar os trabalhos pendentes. As tarefas aperiódicas podem ser executadas até suas finalizações ou até que o "orçamento" seja exaurido. Muitos servidores têm sido propostos. O servidor de troca de prioridade e o servidor de deferimento são os propostos por (LEHOCZKY, 1987). O servidor esporádico foi introduzido por (SPRUNT, 1989). A principal diferença entre o foco dos principais servidores é a maneira com que o

"orçamento" é reabastecido e a capacidade máxima do servidor. Os servidores acima têm sido desenvolvidos para o caso de prioridade fixa. Técnicas similares também existem para o caso de prioridade dinâmica (i. e., EDF), consulte, e. g., (SPURI, 1996). Um servidor baseado em EDF com propriedades especialmente interessantes é o servidor com largura de banda constante (constant bandwidth server - CBS) (ABENI, 1998).

### 3.2.4.1 Servidor com largura de banda constante (Constant Bandwidth Server - CBS)

O servidor com largura de banda constante (constant bandwidth server - CBS) cria a abstração de uma CPU virtual com uma dada capacidade (ou largura de banda)  $U_s$ . Tarefas executando dentro do CBS não podem consumir mais que uma capacidade reservada. Com isso, visto externamente, o CBS aparecerá como uma tarefa EDF normal com uma máxima utilização de  $U_s$ . A granularidade do tempo da abstração da CPU virtual é determinada pelo período do servidor  $T_s$ .

Associados com um servidor estão dois atributos dinâmicos: o "orçamento" do servidor  $c_s$  e o deadline do servidor  $d_s$ . Trabalhos que chegam ao servidor são colocados em uma fila e são atendidos em ordem de chegada. O primeiro trabalho na fila é sempre eleito para execução (como uma tarefa normal EDF), usando a deadline atual  $d_s$  do servidor. O servidor é inicializado com  $c_s := 0$  e  $d_s := 0$ . As regras para atualização do servidor são as seguintes:

1. Durante o trabalho de execução, o "orçamento"  $c_s$  é decrementado a uma taxa unitária
2. Sempre quando  $c_s = 0$ , o "orçamento" é reabastecido para  $c_s = U_s T_s$  e a deadline é postergada por um período do servidor:  $d_s = d_s + T_s$
3. Se um trabalho chega em um tempo  $r$  quando a fila do servidor está vazia e se  $c_s \geq (d_s - r)U_s$ , então o "orçamento" é reabastecido para  $c_s = U_s T_s$  e a deadline é setada para  $d_s = r + T_s$

As regras acima limitam a demanda de processamento do servidor em qualquer intervalo  $[t_1, t_2]$  para  $U_s(t_2 - t_1)$ . A terceira regra é usada para "resetar" o servidor depois de um intervalo ocioso suficientemente longo. Note que postergar a deadline corresponde a diminuir a prioridade dinâmica do servidor.

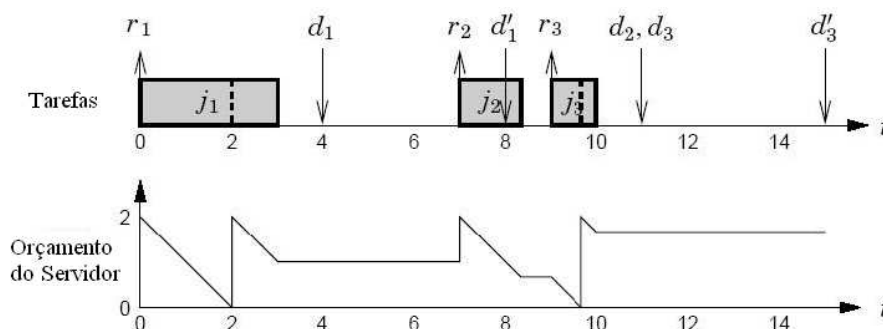


Figura 28: Exemplo de um servidor com largura de banda constante (constant bandwidth server -CBS) com largura de banda  $U_s = 0.5$  e o período  $T_s = 4$  atendendo aperiodicamente os trabalhos que chegam. As setas para cima indicam trabalhos que chegam e setas para baixo as deadlines

Um exemplo de escalonamento CBS é dado na Figura 28. O servidor é assumido ter uma largura de banda  $U_s = 0.5$  e um período  $T_s = 4$ . Em  $t = 0$ , o servidor é esvaziado e a tarefa  $j_1$  chega. O "orçamento" é carregado para  $U_s T_s = 2$  e o trabalho é atendido com uma deadline  $d_1 = r_1 + T_s = 4$  (regra 3). Em  $t = 2$ , o "orçamento" é exaurido. O "orçamento" é reabastecido para  $U_s T_s = 2$  e o restante de  $j_1$  (uma unidade de tempo) é atendido usando a deadline postergada  $d_{p1} = d_1 + T_s = 8$  (regra 2). Em  $t = 7$ , o trabalho  $j_2$  chega. A regra 3 está em operação, causando o reabastecimento do "orçamento" e do estabelecimento da deadline para  $d_2 = r_2 + T_s = 11$ . Em  $t = 9$ , o trabalho 3 chega. A regra 3 não está em operação, então o trabalho é atendido com a velha deadline do servidor  $d_3 = d_2 = 11$ . Em  $t = 9,7$ , o "orçamento" é novamente exaurido, sendo em seguida reabastecido e o restante do trabalho (0,3 unidades) é servido usando-se a procrastinação da deadline  $d_{p3} = d_3 + T_s = 15$ .

## 4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REDES FF SOB A INFLUÊNCIA DE ATRASOS GERADOS PELA COMUNICAÇÃO

### 4.1 Análise teórica e simulações

#### 4.1.1 Escalonamento de mensagens na rede Foundation Fieldbus

O escalonamento de mensagens exerce um papel fundamental nos sistemas de controle em rede, sendo responsável direto pelo determinismo temporal e pelo estabelecimento das prioridades e interdependências das mensagens.

O algoritmo de escalonamento empregado nas redes Foundation Fieldbus, especificamente através da configuração gerada pelo software Syscon (produzido pela empresa brasileira Smar), não é apresentado em nível de código ou formulação algorítmica, o único dado disponível sobre o escalonamento é seu fluxograma, que apresenta alguns pontos levados em consideração na formulação do escalonamento a ser empregado. O escalonamento das redes Foundation Fieldbus é dinâmico, uma vez que, estando em funcionamento, há a possibilidade de se fazer alterações de parâmetros vinculados à atividades de controle em tempo de execução, gerando com isso um fluxo adicional de mensagens circulantes no barramento, o que exige que o escalonamento seja redimensionado.

O fluxograma do algoritmo de escalonamento é apresentado a seguir pela Figura 29.

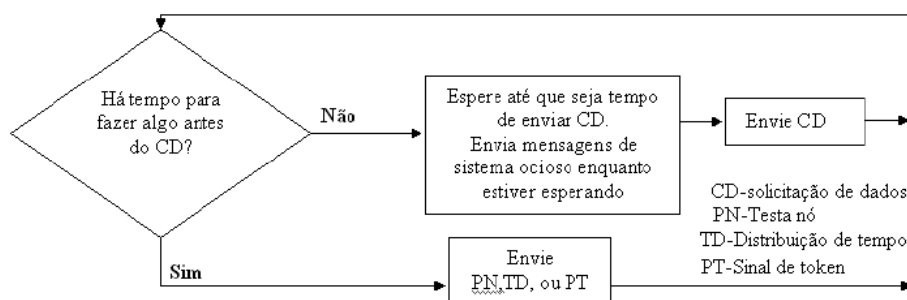


Figura 29: Fluxograma do algoritmo de escalonamento

Como abordado na seção 2.4, a mensagem solicitação de dados (Compel Data - CD) é enviada ao dispositivo encarregado pela publicação de uma mensagem periódica e, ao receber esta mensagem, o dispositivo em questão publica os dados periódicos relativos àquela requisição. A mensagem atesta estação (Probe Node - PN) é enviada no espaço de tempo reservado para as mensagens aperiódicas e tem por finalidade a manutenção

da lista de dispositivos ativos no barramento (Live List). Um dispositivo participante do barramento ao receber uma mensagem de atesta estação, responde imediatamente ao agendador de link ativo (LAS) atestando sua presença no barramento, caso esta resposta não ocorra repetidas vezes, o dispositivo é retirado da lista de equipamentos ativos (Live List). A mensagem de distribuição de tempo (Time Distribution - TD) é responsável pela sincronização global dos relógios de todos os equipamentos participantes do barramento.

A ferramenta de configuração Syscon não permite a intervenção direta na política de escalonamento a ser utilizada no sistema de controle em rede definido pela aplicação, contudo, o macrociclo definido pode ser alterado (de forma limitada) através do dimensionamento do parâmetro background traffic, que determina o tempo destinado a mensagens de segundo plano, dentre elas as mensagens aperiódicas.

A fabricante Smar em (SMAR, 2002), apresenta fórmulas matemáticas para a definição do macrociclo ideal nos casos de sistemas não-redundantes e redundantes, baseando-se somente no número de dispositivos presentes no canal Fieldbus e no número de ligações externas presentes na configuração de controle (vale lembrar que as ligações externas correspondem às ligações lógicas entre dispositivos diferentes que necessitam do uso do barramento para transmitirem mensagens vinculadas ao sistema de controle definido na aplicação). Vale lembrar que em (SMAR, 2002) não é apresentada nenhuma justificativa teórica para as fórmulas apresentadas, podendo ser subentendido portanto, que tais formulações são empíricas.

Tais expressões são apresentadas a seguir.

#### **Macrociclo ideal Não-Redundante**

$$\text{Macrociclo} = [(30 \times NDEV) + (30 \times NEL)] \times 1,2$$

#### **Macrociclo ideal Redundante**

$$\text{Macrociclo} = [(60 \times NDEV) + (30 \times NEL)] \times 1,2$$

Onde,

NDEV corresponde ao número de dispositivos de campo da rede fieldbus

NEL é o número de links externos presentes na configuração de controle

#### **4.1.2 Influência do aumento do número de laços**

O software de configuração Syscon, através de seu algoritmo de escalonamento, determina o macrociclo da aplicação baseando-se fundamentalmente no número de dispositivos, blocos e ligações externas. Muitas vezes, o macrociclo definido não é ideal (levando-se em consideração a definição de macrociclo ideal descrita na subseção anterior 4.1.1), com isso, o ajuste manual do macrociclo através do redimensionamento do tráfego de segundo plano (background traffic) torna-se aconselhável.

No caso onde há a adição de novas malhas de controle em um mesmo canal, o macrociclo definido pela ferramenta de configuração é aumentado, pois existe um aumento do número de blocos, dispositivos e ligações externas. Pode-se notar que nenhum algoritmo de escalonamento ótimo é aplicado, a fim de se manter ou minimizar o incremento no macrociclo a ser definido.

O aumento do macrociclo pode influenciar de forma direta o desempenho do sistema de controle definido, uma vez que, aumentam-se os períodos de amostragem das variáveis vinculadas ao controle do sistema e tal aumento contribui para a degradação do desempenho como denotado na seção 3.1.5.

### 4.1.3 Influência da alocação dos blocos funcionais

Devido a existência de diversos blocos funcionais e de sua disponibilidade para grande parte dos transmissores, os algoritmos de controle implementados pelo software de configuração Syscon podem ser estabelecidos de diferentes formas, considerando os mesmos blocos funcionais usados pela aplicação, alocados em transmissores diferentes e de diversas maneiras.

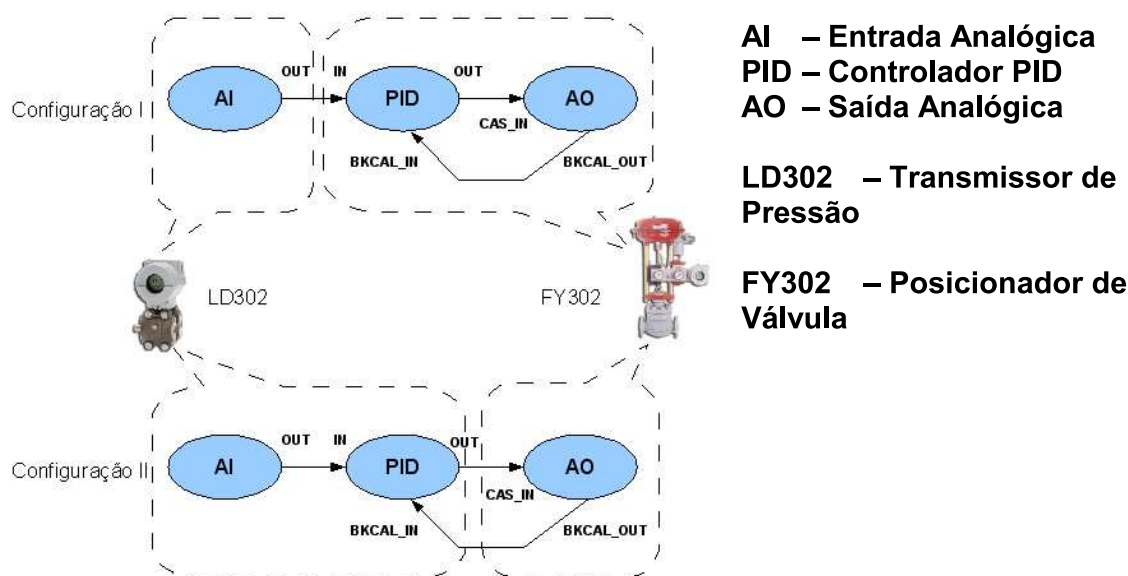


Figura 30: Exemplo de diferentes alocações de blocos funcionais para o mesmo algoritmo de controle

Considere a malha de controle apresentada pela Figura 5, a configuração lógica estabelecida pelo software Syscon pode ser realizada de duas formas diferentes, como mostrado pela Figura 30. Analisando-se as duas possíveis configurações, observa-se que na primeira delas há apenas uma ligação externa entre dispositivos diferentes, havendo com isso, um fluxo menor de mensagens geradas que necessitam fazer uso do barramento. Na segunda configuração, observa-se duas mensagens que necessitam do barramento para sua transmissão, gerando um aumento no tráfego de mensagens pelo barramento. Um outro aspecto que pode ser ressaltado é a proximidade do bloco responsável pelo algoritmo de controle (bloco funcional **PID**) em relação ao atuador (bloco funcional **AO**), fato esse, que garante um maior determinismo temporal e uma atuação mais rápida e segura no caso de eventuais falhas envolvendo o barramento.

Em função do aumento do número de ligações externas, o macrociclo definido pelo software de configuração é aumentado, o que não é interessante sob o ponto de vista do sistema de controle, que pode ter seu desempenho degradado devido ao aumento dos períodos de amostragem envolvidos no algoritmo de controle.

### 4.1.4 Impacto da variação do período de amostragem sobre o desempenho

Como visto anteriormente, a escolha dos períodos de amostragem influencia de forma direta o desempenho do sistema de controle, podendo afetar significativamente a operacionalidade do sistema controlado.

O período de amostragem definido para aplicação pode sofrer variações dependendo



do protocolo de rede utilizado, sendo que o comportamento desta variação é intrinsicamente ligado às características da rede usada.

Uma outra questão a ser considerada é a precedência dos blocos funcionais. Será evidenciado, através dos exemplos apresentados, a importância da questão da precedência no desempenho do sistema de controle.

A Figura 31 representa um sistema de controle constituído por um controlador discreto e um sensor com períodos de amostragem iguais a 287 [ms]. A precedência não foi considerada para o sistema simulado. A variação do período de amostragem é aleatória e atinge um máximo de  $\pm 10$  [ms]. O sistema representado pela função de transferência  $G(s)$  apresenta como parâmetros de desempenho dinâmico um máximo sobrepasso de 10% e um tempo de acomodação de 5,74 [s] (para o sistema contínuo realimentado). O gráfico mostrado na Figura 32 apresenta as respostas temporais do sistema para as 1000 simulações realizadas. Visto que as variações nos períodos de amostragem da saída e do sinal de controle são aleatórios, foram realizadas muitas simulações (1000) para que fosse evidenciada a influência da aleatoriedade da variação do período de amostragem no desempenho do sistema de controle.

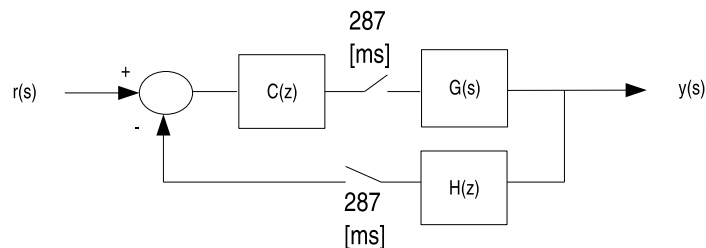


Figura 31: Sistema de controle amostrado

Sendo:

$$C(z) = 1 \quad G(s) = \frac{1,3896}{s^2 + 1,3937s} \quad H(z) = 1$$

Pode-se concluir através da análise da Figura 32 que a variação no período de amostragem, mesmo que pequena (sendo que a variação máxima estabelecida é de  $\pm 10$  [ms]), o que corresponde a aproximadamente 3,48% do período de amostragem de 287 [ms]), impacta no desempenho do sistema de controle de maneira significativa, visto que o máximo sobrepasso pode variar de 18% a 33,8% e o tempo de acomodação de 6 [s] a 10 [s]. Vale lembrar que os parâmetros de desempenho definidos pela dinâmica do sistema contínuo de segunda ordem adotado são 5,74 [s] de tempo de acomodação e 10% de máximo sobrepasso. Um outro fator a ser lembrado é a questão da precedência, isto é, o fato de o controlador não esperar pelo dado do sensor para calcular e estabelecer o sinal de controle para planta, neste caso, o controlador utiliza o dado disponível em seu buffer para a realização do cálculo do sinal de controle e caso este dado não tenha sido atualizado pelo sensor, o sinal de controle é calculado baseado em uma informação que não corresponde ao atual estado do sistema, contribuindo com isso, de forma muito significativa para a degradação do desempenho do sistema de controle.

Uma outra simulação foi realizada levando-se em consideração a questão da precedência entre os blocos funcionais, isto é, o controlador  $C(z)$  só calcula e estabelece o sinal de controle depois de recebida a informação proveniente do sensor  $H(z)$ . A precedência

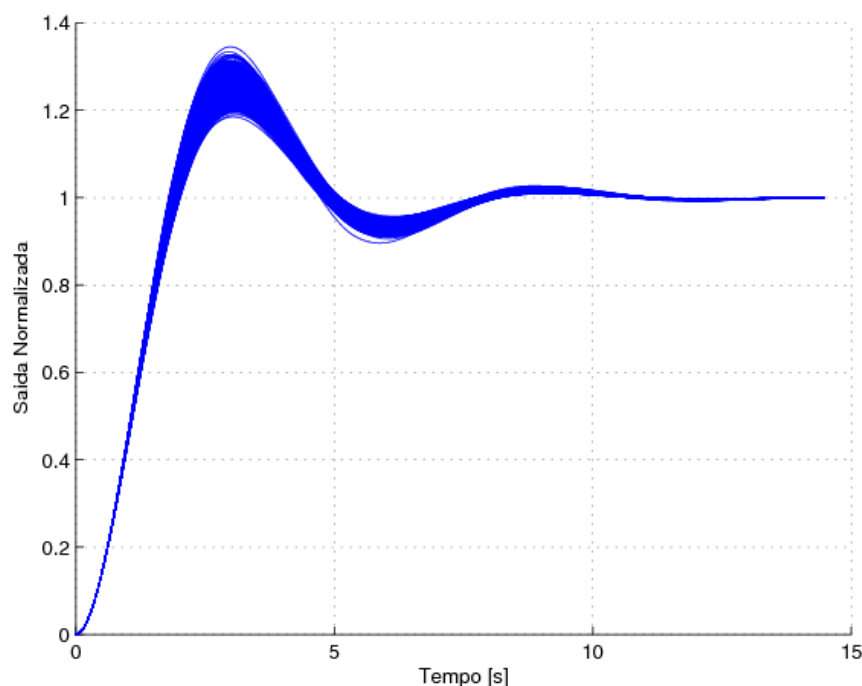


Figura 32: Simulações com variação na taxa de amostragem e controle

garante que o controlador estabeleça o sinal de controle com o estado mais atual do sistema, conferindo com isso, maior robustez à resposta dinâmica do sistema, mesmo sob a influência das variações nos períodos de amostragem. A Figura 33 apresenta as mesmas 1000 simulações realizadas anteriormente, apenas com a diferença que neste caso foi considerada a questão da precedência dos blocos funcionais.

Como pode ser observado na Figura 33, os parâmetros de desempenho do sistema de controle não apresentaram grandes variações, permanecendo praticamente constante para as 1000 simulações realizadas e bastante próximo do comportamento dinâmico esperado do controlador discretizado para uma amostragem de 287 [ms]. O sobrepasso máximo apresentado pelo sistema é da ordem de 18% e o tempo de acomodação de aproximadamente 6,8 [s].

## 4.2 Análise experimental

Para analisar experimentalmente o efeito do atraso na comunicação em uma rede Foundation Fieldbus foi realizada a implementação de um sistema de segunda ordem através de um circuito eletrônico. Tal sistema tem por finalidade evidenciar os efeitos gerados pelo atraso da comunicação no desempenho do sistema de controle. A grande facilidade proporcionada pelos sistemas de segunda ordem é que suas métricas de desempenho (máximo sobrepasso e tempo de acomodação) são analiticamente definidas.

Dois computadores serão utilizados no experimento. Um estará vinculado à Planta Foundation Fieldbus através do software SYSCON e da placa PCI-302 (Interface de Controle de Processos Foundation Fieldbus, fabricada pela empresa brasileira Smar), por onde será efetuada toda configuração do sistema de controle em rede. O segundo computador, munido de uma placa PCI-302 e do software FbView, será utilizado de maneira dedicada à tarefa de monitoração do barramento Foundation Fieldbus, capturando com isso, as men-

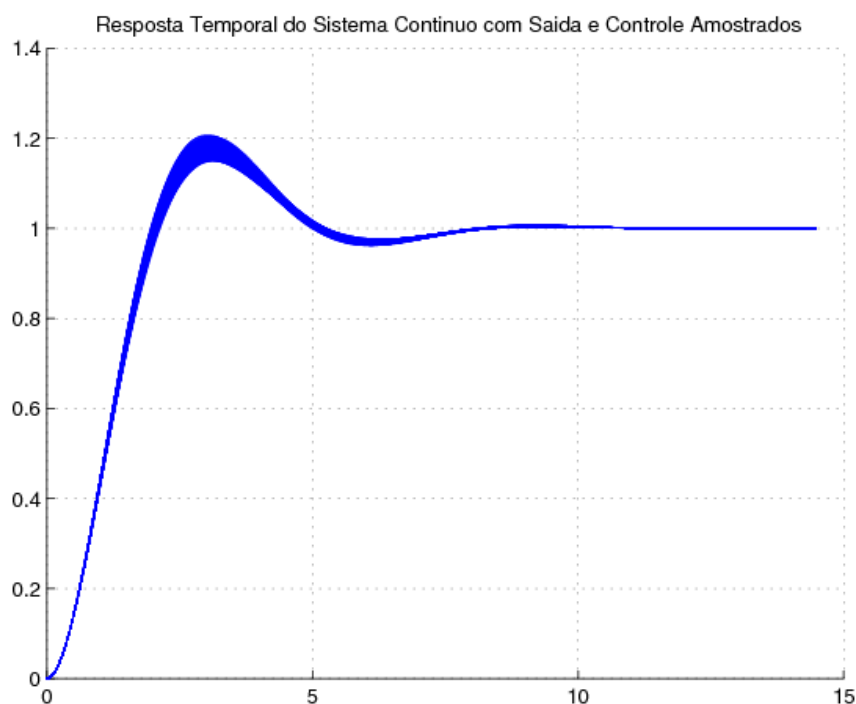


Figura 33: Simulações com variação na taxa de amostragem e controle (Considerando a precedência entre os blocos funcionais)

sagens que trafegam pelo barramento juntamente com os tempos absolutos em que cada mensagem foi capturada (este modo de operação é também conhecido como Sniffer).

Em um primeiro momento, o sistema de controle projetado será avaliado isoladamente. A mensagem periódica relacionada com a ação de controle do sistema será monitorada e análises quantitativas em relação ao determinismo temporal deste tipo de mensagem serão realizadas. O comportamento dinâmico da malha de controle também será acompanhado e comparado com os comportamentos do sistema equivalente discreto e contínuo. Tais comparações permitirão o estabelecimento de uma métrica qualitativa do impacto do atraso gerado pela comunicação no desempenho do sistema de uma maneira geral.

Posteriormente, o sistema de controle projetado será avaliado em conjunto com a Planta FF. As duas malhas de controle serão colocadas em funcionamento em um mesmo canal fieldbus e o determinismo temporal das mensagens de controle correspondentes ao sistema projetado será avaliado novamente. Tal avaliação terá por finalidade observar a eficácia do escalonamento aplicado em redes FF, assim como a verificação do cumprimento dos requisitos temporais exigidos pelo sistema. Novamente, as métricas de desempenho serão avaliadas em relação as métricas obtidas por simulações do mesmo sistema projetado, nos domínios discreto e contínuo.

#### 4.2.1 Equipamentos e softwares usados nos experimentos

Foram utilizados como parte deste experimento: um circuito eletrônico, descrito posteriormente, que simula a dinâmica temporal de um sistema de segunda ordem, a Planta Foundation Fieldbus (especificamente a configuração do controle de nível monovariável) juntamente com um computador munido de uma placa PCI-302 (Interface de Con-

trole de Processos Foundation Fieldbus) e o software Syscon para configuração da rede fieldbus, um computador com uma placa PCI-302 e o software FbView para monitoração das mensagens que circulam pelo barramento, um osciloscópio para medição e aquisição das respostas transitórias do sistema, um transmissor FI302 (Conversor de protocolo Foundation Fieldbus para 4-20[mA]) e um conversor IF302 (Conversor 4-20[mA] para protocolo Foundation Fieldbus).

#### 4.2.2 Protótipo de sistema de segunda ordem

Foi desenvolvido um protótipo de circuito eletrônico que apresenta o comportamento dinâmico de um sistema de segunda ordem. Este protótipo está vinculado ao barramento Foundation Fieldbus através dos transmissores FI302 e IF302.

O diagrama em blocos do sistema contínuo usado como base para implementação do protótipo é apresentado pela Figura 34

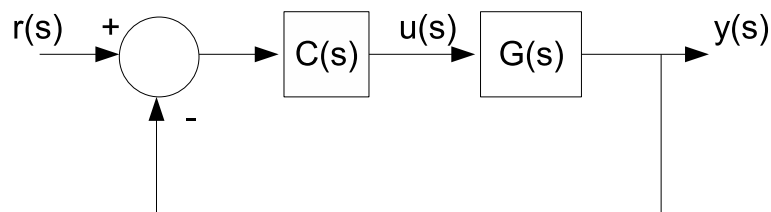


Figura 34: Diagrama em blocos do sistema de 2ª ordem implementado no protótipo

A dinâmica do protótipo implementado é definida pela seguinte função transferência:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Onde,

$$C(s) = 1 \qquad G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s}$$

Como explicitado anteriormente, as métricas de desempenho dos sistemas de segunda ordem são analiticamente determinadas através de expressões bastante conhecidas, tais expressões são apresentadas a seguir.

$$M_p = e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \qquad T_s = \frac{4}{\omega_n\xi}$$

Onde  $M_p$  representa o máximo sobrepasso do sistema e  $T_s$  representa o tempo de acomodação do mesmo. O máximo sobrepasso corresponde ao máximo valor alcançado pela variável de saída (neste caso,  $y(t)$ ) antes de atingido o regime permanente. O tempo de acomodação corresponde ao tempo decorrido desde o início da operação até que o sistema atinja e permaneça dentro da faixa do valor em regime permanente  $\pm 2\%$

As métricas acima apresentadas serão utilizadas como referência para análise do impacto dos atrasos gerados pela comunicação no desempenho do sistema de controle em rede.

O protótipo implementado utiliza dois circuitos integradores analógicos e um circuito somador analógico. Para o interfaceamento entre o protótipo e os transmissores FI302 e

IF302 foram utilizados respectivamente um conversor de corrente-tensão e um condicionador de sinal.

O transmissor FI302 é responsável pela realimentação do sistema, fornecendo para a planta  $G(s)$  o sinal de controle amostrado  $U(z)$ . O transmissor IF302 assume o papel de sensor no sistema de controle, fazendo a aquisição da variável analógica de saída da planta  $y(t)$  e disponibilizando-a de forma amostrada ao transmissor FI302 para que o algoritmo de controle possa ser executado. A Figura 35 apresenta o diagrama em blocos do sistema de segunda ordem implementado e sua integração com os transmissores IF302 e FI302.

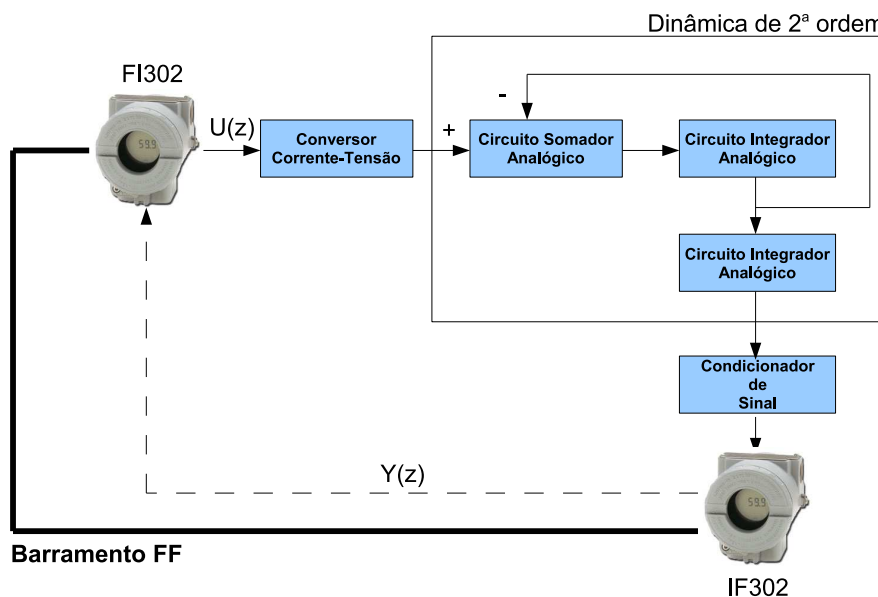


Figura 35: Diagrama esquemático do protótipo desenvolvido

#### 4.2.3 Planta Foundation Fieldbus

O Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica (LASCAR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul é equipado com uma Planta Piloto - Foundation Fieldbus constituída fisicamente por três tanques interconectados entre si por tubulações. A idéia central é a configuração de uma unidade de processamento de substâncias líquidas. Para isto conta-se adicionalmente com cinco válvulas proporcionais, quatro motobombas, atuadores para aquecimento, sensores de temperatura do tipo PT-100, sensores de nível do tipo pressão em coluna d'água e placas de orifício utilizadas na medição de vazão. Várias estruturas e laços de controle podem ser implementados. Mais especificamente é possível a implementação de laços de controle de processos mono e multivariáveis de temperatura, nível e vazão.

A planta Foundation Fieldbus será utilizada com a finalidade de se gerar tráfego de mensagens no barramento. Especificamente será utilizada a configuração de controle de nível monovariável, que consiste em um sistema de controle em malha fechada que mantém o nível de um tanque em um determinado valor pré-estabelecido de acordo com a referência adotada. Para realização desta configuração de controle são utilizados os seguintes equipamentos: um computador equipado com a interface de controle de processos Foundation Fieldbus (PCI-302) juntamente com o software de configuração Syscon, uma fonte de alimentação PS302, um módulo de impedância ativa PSI302, um transmissor de pressão LD302 (utilizado para a leitura da pressão diferencial no tanque 1), um trans-

missor FI302 (utilizado no controle do inversor de frequência), uma bomba d'água, uma válvula com posicionador FY302 e dois terminadores de barramento BT302. A Figura 36 mostra o arranjo dos equipamentos citados e uma foto da planta Foundation Fieldbus.

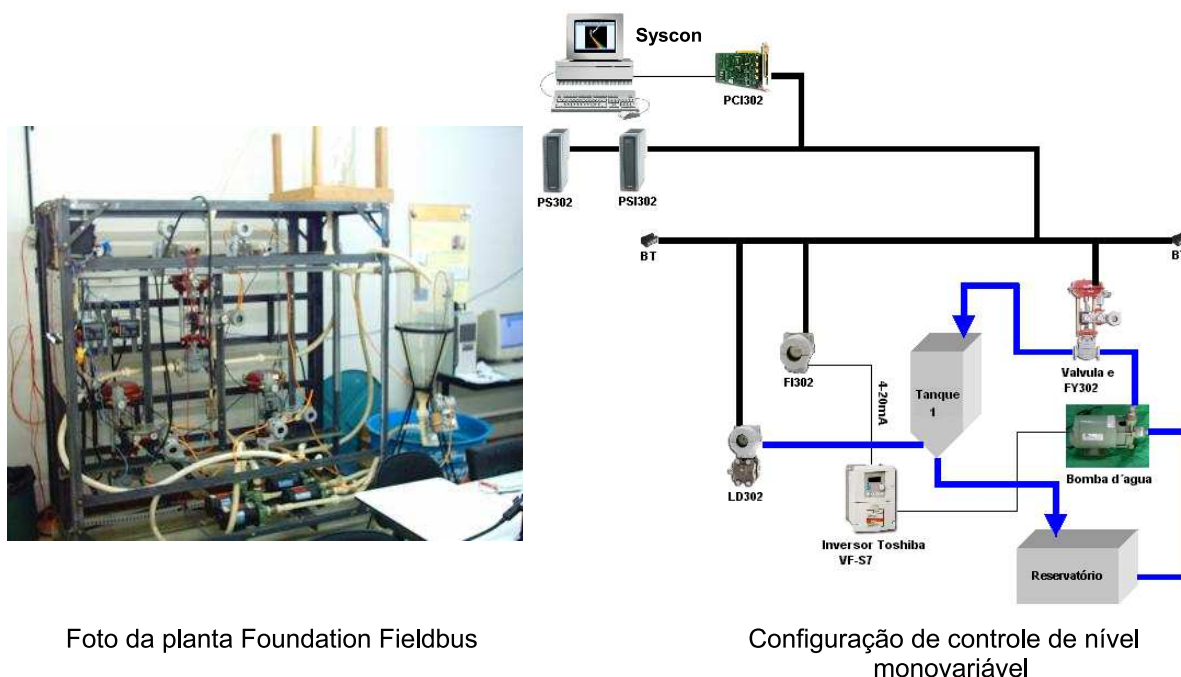


Foto da planta Foundation Fieldbus

Configuração de controle de nível monovariável

Figura 36: Planta Foundation Fieldbus - Controle de Nível Monovariável

#### 4.2.4 Software de configuração - Syscon

O software Syscon é uma das ferramentas comerciais utilizadas na configuração dos dispositivos da rede industrial Foundation Fieldbus. Através desta ferramenta, todo o algoritmo de controle e configuração dos dispositivos pertencentes a rede Foundation Fieldbus são transmitidos e armazenados nos próprios dispositivos envolvidos no sistema de controle. Esta foi a ferramenta de configuração adotada para o desenvolvimento das aplicações dispostas neste trabalho.

#### 4.2.5 Software de monitoração de mensagens - FbView

O software FbView é destinado à monitoração de mensagens que trafegam pelo barramento Foundation Fieldbus. Ele pode ser utilizado basicamente de duas formas. A primeira alternativa é através do uso da mesma interface utilizada como LAS, o que afeta o determinismo temporal da monitoração pois o hardware é compartilhado entre os processos de gestão do barramento e a atividade de monitoração. Uma segunda abordagem é a utilização de uma interface dedicada à tarefa de monitoração, garantindo-se com isso, o determinismo temporal necessário para o estudo proposto. O software FbView também pertence a linha de produtos da empresa Smar Equipamentos Industriais.

#### 4.2.6 Experimentos realizados

Foram realizados basicamente dois experimentos, o foco principal foi a observação do impacto gerado pela comunicação no desempenho do sistema de controle. Tais experimentos também permitiram a observação do comportamento da ferramenta de configuração (Syscon) perante as necessidades de flexibilidade no que tange as questões de

escalamento. Uma avaliação do tráfego das mensagens permitiu posteriormente, uma avaliação do determinismo temporal alcançado pela rede Foundation Fieldbus e suas limitações práticas.

#### 4.2.6.1 Experimento I

O arranjo físico do experimento I pode ser observado na Figura 37. O protótipo foi projetado baseado no tempo de amostragem definido pela ferramenta de configuração Syscon e pelos critérios de escolha do período de amostragem apresentados na seção 3.1.5.

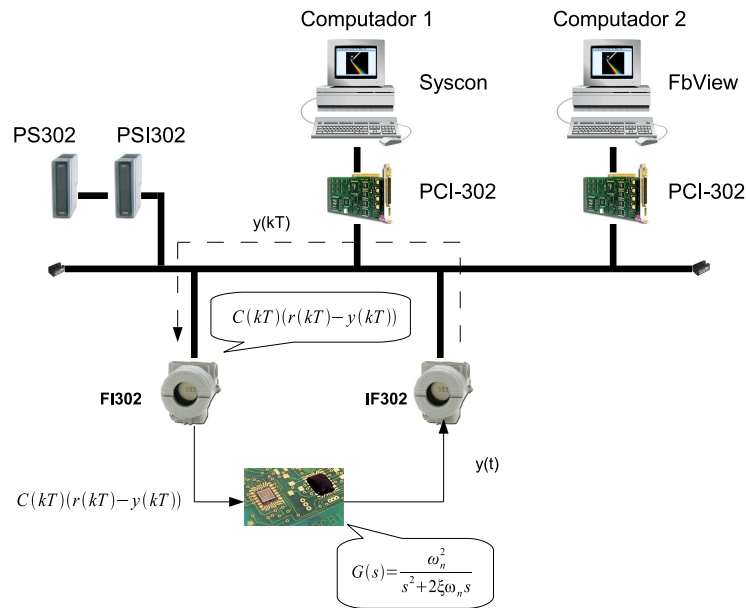


Figura 37: Configuração Física do experimento I

O critério de escolha do período de amostragem apresentado pela seção 3.1.5 é voltado basicamente a sistemas com dinâmica de 1ª ordem ou sistemas de 2ª ordem cuja decomposição em sistemas de 1ª ordem por frações parciais é possível. O caso considerado nos experimentos realizados, define pólos complexos para o sistema, o que o leva a apresentar comportamento dinâmico diferente daquele definido em sistemas de 1ª ordem. Nos experimentos realizados, o critério de escolha do período de amostragem será considerado o mesmo critério apresentado na seção 3.1.5, mas a constante de tempo dominante será definida como 1/4 do tempo de acomodação  $T_s$ .

$$T_{padrao} = \text{Macrociclo}_{SYS\text{CON}} = \frac{CT}{5} = \frac{T_s}{5 \times 4} = \frac{1}{5\xi\omega_n} = 287[\text{ms}]$$

Definindo o máximo sobrepasso em  $M_p = 10\%$ , obtém-se o seguinte sistema:

$$G(s) = \frac{1,39}{s^2 + 1,394s}$$

com as seguintes métricas de desempenho:

$$T_s = 5,74[\text{s}]$$

$$M_p = 10\%$$

Uma observação importante a respeito do modelo adotado é que tempos de acomodação muito curtos exigem grandes esforços de controle, que variam muito em curtos intervalos de tempo, o que acaba inviabilizando a aplicação devido às limitações do hardware e protocolo utilizados, que não conseguem, muitas vezes, amostrar e atuar no sistema a uma taxa condizente a dinâmica apresentada pelo mesmo.

A configuração lógica estabelecida na ferramenta de configuração Syscon e usada na rede industrial é apresentada pela Figura 38.

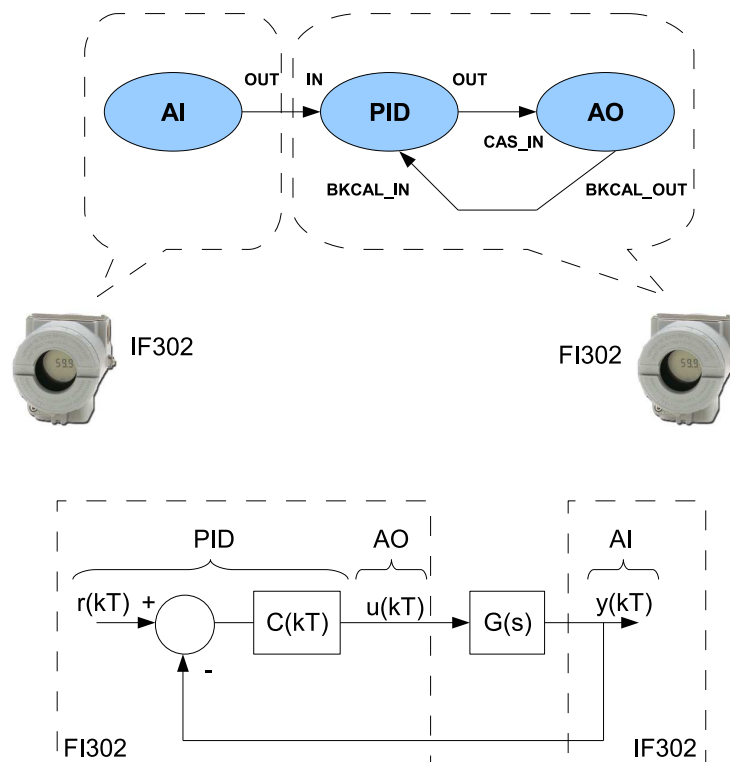


Figura 38: Configuração lógica da malha de controle implementada no experimento I

Onde **OUT** (no bloco **AI**) representa o valor de saída da planta (circuito eletrônico), gerado pelo protótipo implementado, que é adquirido pelo transmissor IF302 e disponibilizado para a lógica de controle através do bloco funcional **AI**. Uma vez recebido pelo bloco **PID**, através da porta **IN** (que indica ao bloco **PID** que se trata da leitura da variável do processo), é realizada a subtração do valor da variável do processo de um valor de referência estabelecido pelo operador do sistema, sendo logo após multiplicado por uma constante  $K$  e enviado ao bloco funcional **AO** através da porta **OUT** do bloco **PID**. O bloco **AO** recebe esta informação através da porta **CAS\_IN**, indicativo de que esse sinal é um sinal de referência que deve ser estabelecido na saída do bloco **AO**. Uma vez munido desta informação, o bloco **AO** se encarrega de informar o hardware o valor da corrente a ser gerada para realimentação do protótipo. Os sinais de **BKCAL\_IN** e **BKCAL\_OUT** são utilizados para prevenção de windup e como forma de se evitar ações de controle muito bruscas ao se chavear do modo manual de operação para o modo automático. Na mesma Figura 38 pode-se observar a correspondência entre o diagrama em blocos do processo, representado pela dinâmica contínua da planta  $G(s)$  e as dinâmicas amostradas do controlador e do sensor, juntamente com a configuração da malha de controle realizada pelo software Syscon.

Como mostrado na Figura 38, existem 3 blocos funcionais (**AI**, **PID**, **AO**) e três links



entre eles que representam inter-dependências funcionais entre os blocos. Como o bloco **AI** foi instanciado no transmissor IF302 e o bloco **PID** foi instanciado no transmissor FI302, será necessário que o transmissor IF302 (bloco **AI**) gere uma mensagem e a envie ao bloco **PID** localizado no transmissor FI302 via barramento. As mensagens geradas entre os blocos **PID** e **AO** não ocupam o barramento pois são internas a um mesmo dispositivo, sendo portanto, processadas no próprio transmissor FI302.

O computador 2, como se pode notar através da Figura 37, está ligado ao mesmo barramento do sistema de controle em rede e tem por objetivo monitorar as mensagens que trafegam pelo barramento, mais especificamente a mensagem gerada pelo bloco **AI** que contém a informação do valor lido na saída do protótipo, que por sua vez, é fornecida ao bloco **PID** do transmissor FI302.

Será apresentado como resultado um histograma indicando o número de ocorrências dos vários períodos obtidos, relativos às mensagens enviadas pelo bloco **AI** ao bloco **PID** juntamente com uma análise sobre o determinismo temporal alcançado pelas mensagens. Uma segunda análise será direcionada à resposta dinâmica do sistema, sendo comparadas, a simulação da dinâmica contínua do modelo utilizado, a simulação do modelo contínuo através de uma realimentação discreta com período de amostragem igual ao valor do macrociclo definido pela ferramenta de configuração Syscon e a dinâmica obtida através do ensaio descrito pelo experimento I.

#### 4.2.6.2 Experimento II

O experimento II tem por objetivo verificar o comportamento do sistema de controle no caso onde o número de blocos instanciados na lógica de controle é aumentado, o que por consequência gera um aumento no número de mensagens circulantes no barramento. Para se alcançar tal objetivo, foi implementado o experimento apresentado pela Figura 39.

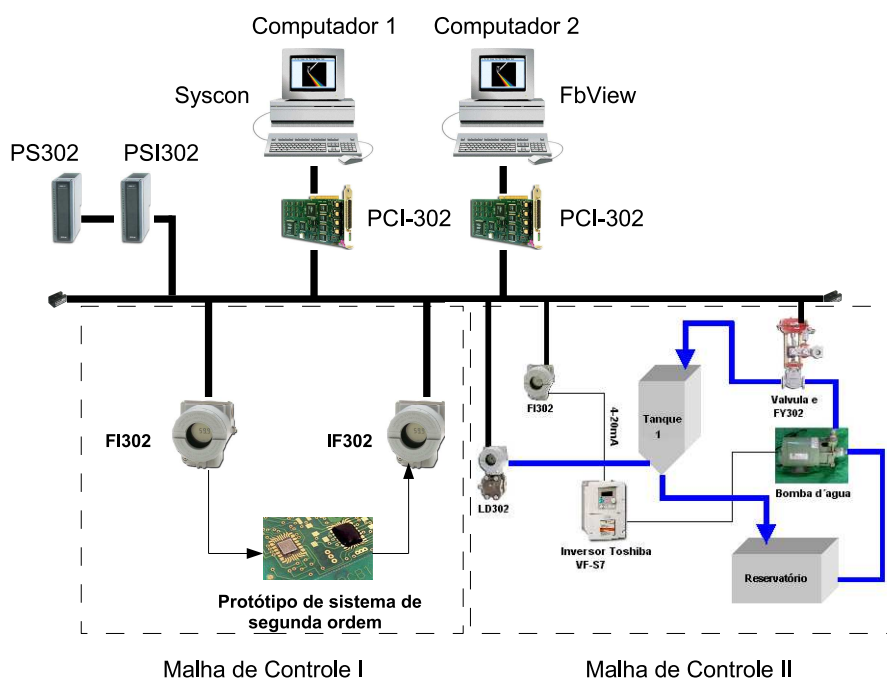


Figura 39: Configuração física do experimento II

Pode-se perceber, através da análise da Figura 39, que existem duas malhas de controle, sendo a primeira malha destinada ao controle do protótipo desenvolvido e a segunda focada no controle de nível da planta Foundation Fieldbus do Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica (LASCAR).

As métricas de desempenho utilizadas para o projeto do protótipo são as mesmas definidas no experimento I, ou seja, máximo sobrepasso  $M_p = 10\%$  e tempo de acomodação  $T_s = 5,74[s]$ . A configuração lógica do sistema é apresentada na Figura 40.

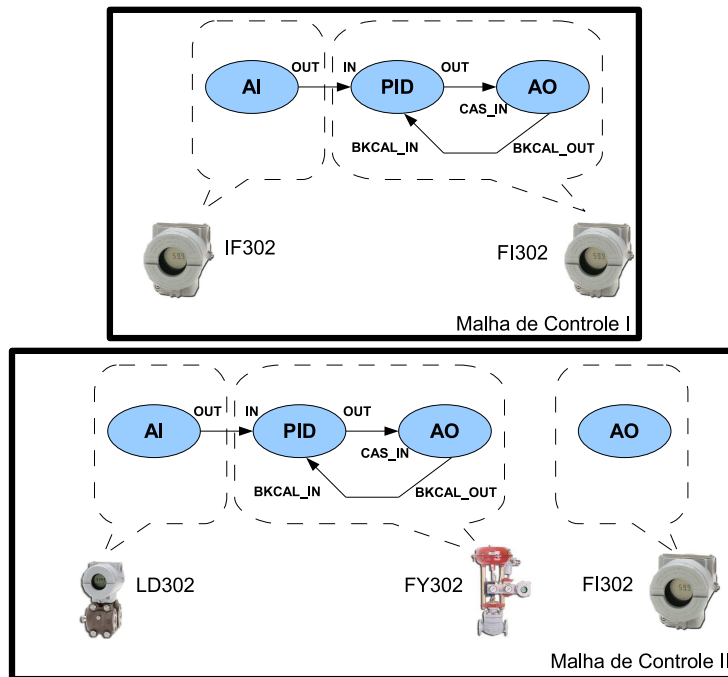


Figura 40: Configuração lógica do experimento II

Vale lembrar que as malhas de controle I e II são independentes e os dispositivos de ambas compartilham única e exclusivamente o meio de comunicação (barramento), sendo que não existe vínculo lógico nenhum entre as malhas de controle citadas. O funcionamento da malha de controle I continua seguindo o mesmo comportamento descrito na seção 4.2.6.1. No sistema de controle de nível nota-se que o bloco **AI** é instanciado no transmissor LD302 (transmissor de pressão Foundation Fieldbus), sendo que, através da pressão captada pelo sensor é estimado o nível de água no tanque e esta informação é enviada para o bloco **PID** localizado no transmissor FY302 (Posicionador de Válvula Foundation Fieldbus). Com esta informação, o bloco funcional **PID** executa o algoritmo de controle e gera um sinal que é enviado ao bloco funcional **AO**, este então, posiciona a abertura da válvula de acordo com o sinal recebido. Novamente, a única mensagem que exige uso do barramento para sua transmissão é a mensagem gerada pelo bloco **AI**. O transmissor FI302 na malha de controle II, através do bloco **AO**, é responsável pelo controle do inversor de frequência que aciona a bomba d'água. Como se pode perceber, o bloco **AO** não apresenta conexão alguma com nenhum outro bloco funcional, isto porque, o bloco **AO** foi configurado no modo "Automático" e sua saída é determinada através do parâmetro "SP" (Set Point) que é escolhido manualmente pelo operador no momento em que a planta é colocada em funcionamento.

Após a realização do experimento II as distribuições temporais dos períodos de amostragem, correspondentes as mensagens geradas no bloco **AI** da malha de controle I, serão

analisadas. Da mesma forma apresentada no experimento I, uma análise do determinismo temporal será mostrada juntamente com uma comparação do desempenho do sistema de controle implementado em relação as dinâmicas contínua e contínua com sinal de saída amostrado com período de amostragem igual ao macrociclo definido pela ferramenta de configuração Syscon.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Experimento I

O primeiro experimento foi realizado como descrito na seção 4.2.6.1. O sistema foi colocado em operação e os valores gerados na saída do protótipo captados por um osciloscópio com capacidade de armazenamento de dados. Paralelamente ao sistema de controle em rede, o computador 2 através da interface de controle de processos PCI302 e do software FbView fazia a aquisição das mensagens geradas pelo bloco funcional **AI** do transmissor IF302, que por sua vez, eram direcionadas ao bloco funcional **PID** do transmissor FI302. Depois de captadas as mensagens, todos os dados (aproximadamente 14486 amostras) foram salvos em um arquivo e posteriormente filtrados e analisados.

O primeiro resultado apresentado é um histograma que mostra a distribuição temporal dos períodos das mensagens DT3, que correspondem aos dados aquisitados da saída do protótipo, pelo transmissor IF302, e disponibilizados para o transmissor FI302 que é o responsável direto pela realimentação do sistema.

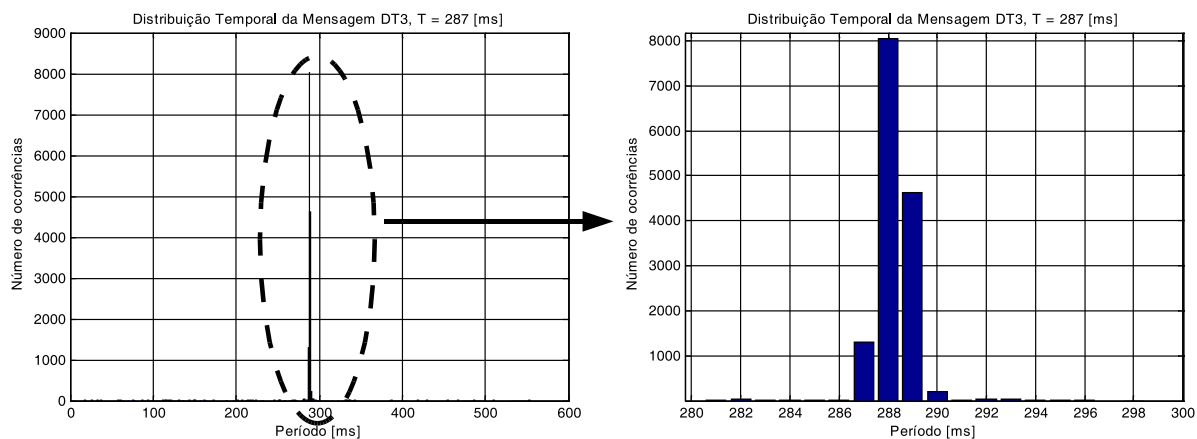


Figura 41: Histograma relativo aos períodos das mensagens DT3

Analisando-se o histograma apresentado acima pode-se notar que a maior concentração dos valores dos períodos de amostragem da mensagem DT3 se dá no intervalo compreendido entre 284 [ms] e 294 [ms], correspondendo a cerca de 98,84% dos períodos de amostragem verificados. O valor definido pela ferramenta de configuração Syscon foi de 287 [ms]. A Tabela 2 apresenta um resumo estatístico sobre a dispersão de dados analisada.

A coluna "Syscon" representa o valor do período de amostragem definido pela ferramenta de configuração Syscon, a coluna "Máximo" representa o máximo período entre

Tabela 2: Resumo estatístico da monitoração das mensagens DT3

Período [ms]				
Syscon	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
287	553	18	287,89	10,61

duas mensagens DT3 (esta mensagem contém o valor de  $y(t)$  lido pelo transmissor IF302 que é disponibilizado para o transmissor FI302), a coluna "Mínimo" representa o mínimo período entre duas mensagens DT3, a coluna "Média" representa a média aritmética de todos os períodos de amostragem das mensagens DT3 circulantes no barramento e a coluna "Desvio Padrão" representa o desvio padrão de todos os períodos de amostragem (das mensagens DT3) verificados ao longo do experimento em relação à média calculada.

A Figura 42 apresenta a evolução temporal dos períodos de amostragem verificados ao longo do experimento.

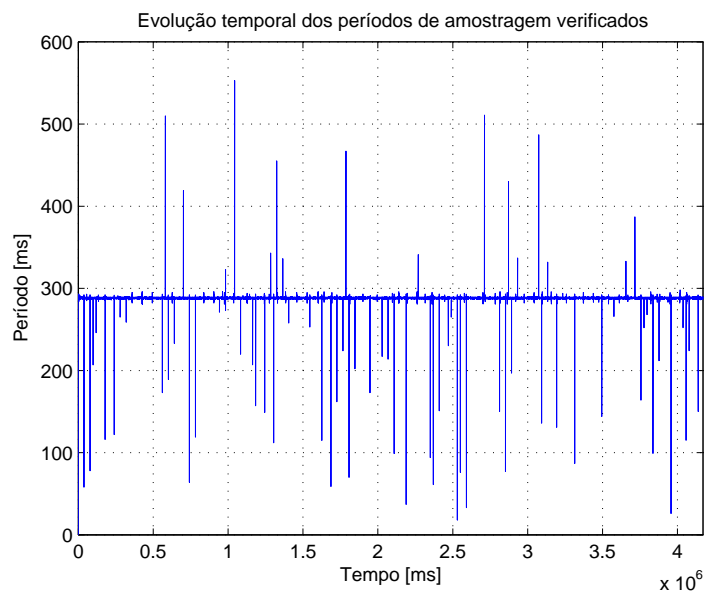


Figura 42: Evolução temporal dos períodos de amostragem da mensagem DT3

Pode-se notar, através da Figura 42, que o período de amostragem definido pela ferramenta de configuração Syscon muitas vezes não é respeitado e, os desvios, embora em sua grande maioria permaneça dentro do intervalo  $T_{SYS\text{CON}} \pm 2\%$ , correspondendo a mais de 98% dos períodos verificados, existem casos onde o desvio atinge proporções preocupantes chegando a superar 92% do valor do período estabelecido pela ferramenta de configuração, comprometendo completamente o determinismo temporal exigido pelas aplicações de tempo real críticas.

A Figura 43 apresenta o diagrama em blocos do primeiro sistema simulado, descrito na seção 4.2.2, onde toda a dinâmica envolvida no sistema é contínua e as métricas de desempenho são definidas na seção 4.2.6.1. O tempo de acomodação  $T_s$  definido pelo modelo adotado é de 5,74 [s] e o sobrepasso  $M_p$  é de 10%.

Como pode ser observado na Figura 52 o modelo simulado segue perfeitamente as métricas de desempenho definidas na seção 4.2.6.1, apresentando tempo de acomodação de 5,74 [s] e um sobrepasso de 10%. Este modelo será utilizado como referência para a posterior comparação com o sistema de controle realizado pela rede industrial Foundation

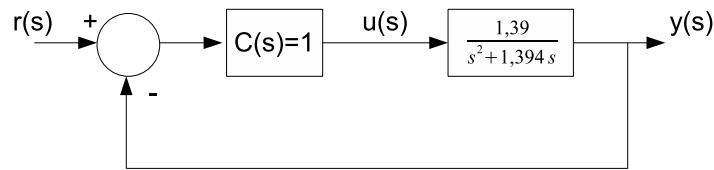


Figura 43: Diagrama em blocos do sistema contínuo usado como referência

Fieldbus.

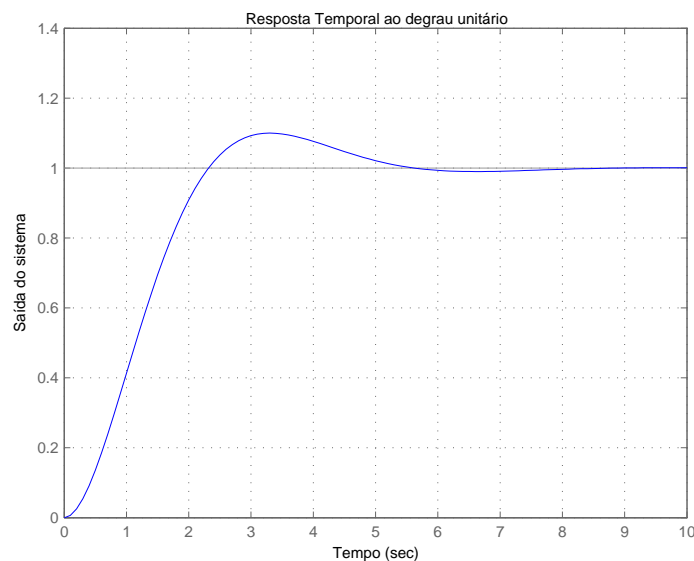


Figura 44: Resposta temporal do sistema ao degrau unitário

A segunda simulação, representada pelo diagrama em blocos da Figura 45, leva em consideração um sistema de controle amostrado, com período de amostragem igual ao período definido pela ferramenta de configuração Syscon, que atua sobre uma planta com dinâmica contínua. O modelo da planta utilizado na simulação é o mesmo definido para a simulação anterior, sendo  $G(s) = \frac{1,39}{s^2 + 1,394s}$ . A Figura 46 mostra o resultado da simulação do sistema.

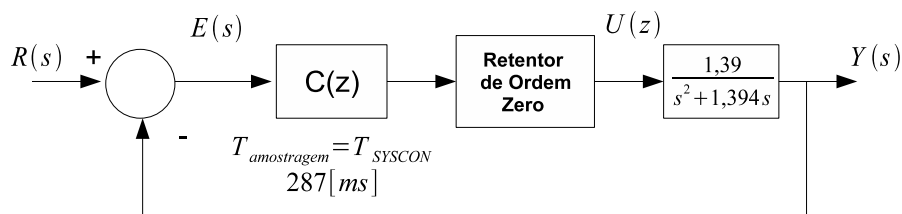


Figura 45: Diagrama em blocos do sistema de controle amostrado e processo contínuo

Como pode ser notado através da Figura 46, ao se utilizar um controle amostrado há uma degradação natural do desempenho do sistema de controle, que está relacionada por sua vez, a taxa de amostragem adotada no controlador. Como dito anteriormente, quanto menor a taxa de amostragem mais próximo ao desempenho do sistema de controle contínuo será a resposta do sistema de controle amostrado. Analisando-se a Figura 46,

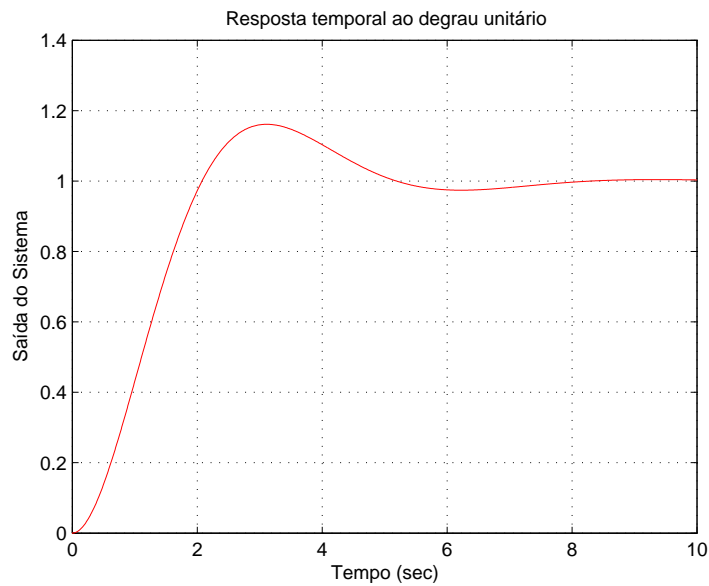


Figura 46: Resposta temporal do sistema de controle amostrado e processo contínuo

pode ser observado que o sistema apresenta um aumento no máximo sobrepasso, que passa a ser  $M_p = 16,12\%$  e o tempo de acomodação  $T_s$  também sofre um incremento, passando a ser de 6,9 segundos.

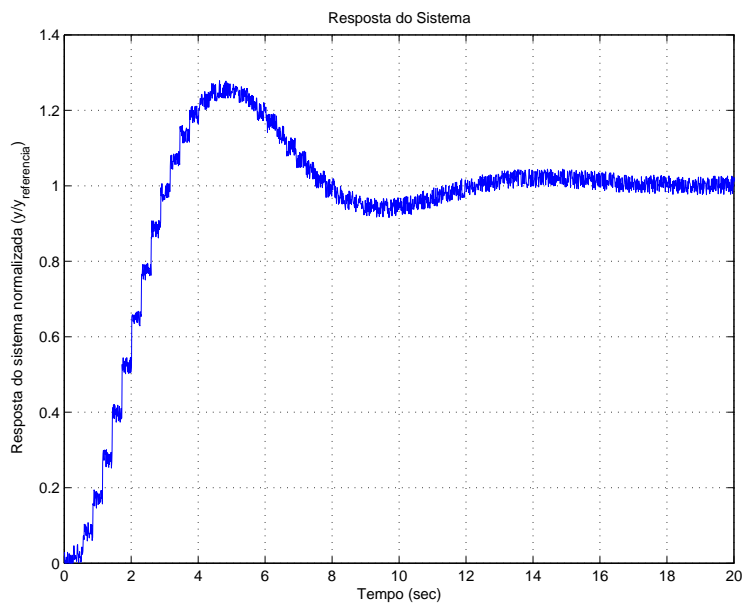


Figura 47: Resposta temporal do sistema projetado

O terceiro caso a ser estudado é o sistema contínuo projetado  $G(s)$  sob o controle dos transmissores FI302 e IF302, pertencentes a rede industrial Foundation Fieldbus. A distribuição temporal das mensagens DT3 referentes às informações produzidas na saída do sistema projetado, adquiridas pelo transmissor IF302 e repassadas ao transmissor FI302 para a execução do algoritmo de controle PID é mostrada na Figura 41. A configuração lógica e o respectivo diagrama em blocos são apresentados pela Figura 38.

A resposta temporal do sistema em questão é apresentada através da Figura 47. Como

pode ser observado o tempo de acomodação do sistema é de aproximadamente 11 segundos e o máximo sobrepasso apresentado pelo mesmo é de 26,20%. Fazendo a apresentação da simulação gerada pelo computador juntamente com a resposta obtida através do ensaio do sistema projetado, pode-se observar na Figura 48 que a variação no desempenho do sistema de controle é de aproximadamente 7% e a variação no tempo de acomodação do mesmo é de aproximadamente 5 segundos. Tais variações podem ser atribuídas a diversos fatores, entre eles, a presença de ruídos e a imprecisão dos componentes, sensores e atuadores utilizados no experimento.

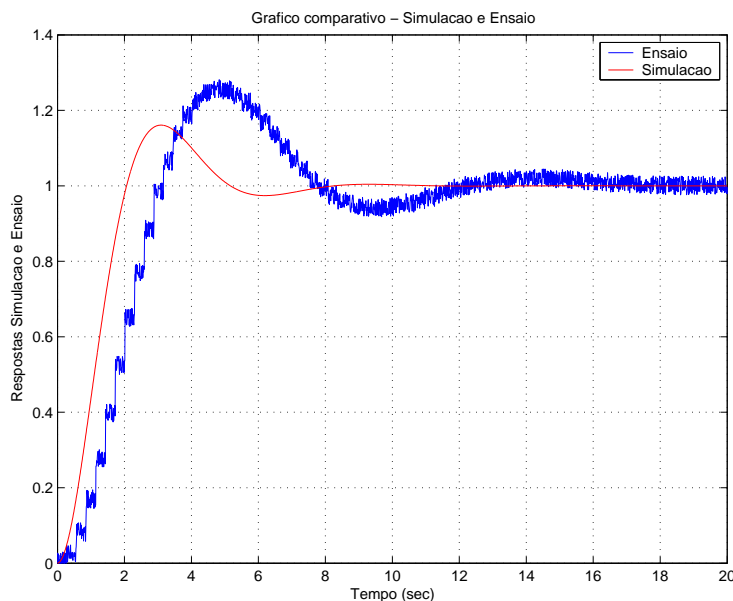


Figura 48: Comparação entre a resposta temporal do sistema projetado e da simulação do sistema de controle amostrado e planta contínua

## 5.2 Experimento II

O segundo experimento realizado apresenta sua descrição na seção 4.2.6.2. O sistema foi colocado em operação e os valores gerados na saída do protótipo foram captados por um osciloscópio com capacidade de armazenamento de dados. Da mesma forma descrita no Experimento I, o computador 2 através da interface de controle de processos PCI302 e do software FbView, paralelamente ao sistema de controle em rede, fazia a aquisição das mensagens geradas pelo bloco funcional **AI** do transmissor IF302, que por sua vez, as direcionava ao bloco funcional **PID** do transmissor FI302. Depois de captadas as mensagens, todos os dados (1091 amostras) foram salvos em um arquivo e posteriormente filtrados e analisados. Vale lembrar que a Planta Foundation Fieldbus foi colocada no mesmo barramento que o sistema projetado, para que fosse observada a influência do número de transmissores e blocos funcionais na variação do período de amostragem.

O primeiro resultado apresentado, assim como no Experimento I, é um histograma que mostra a distribuição temporal dos períodos das mensagens DT3, transmitidas pelo transmissor IF302 e destinadas ao transmissor FI302, que correspondem aos dados adquiridos da saída do protótipo, pelo transmissor IF302, e disponibilizados para o transmissor FI302 que é o responsável direto pela realimentação do sistema.

Analisando-se o histograma apresentado pela Figura 49, pode-se notar que a maior



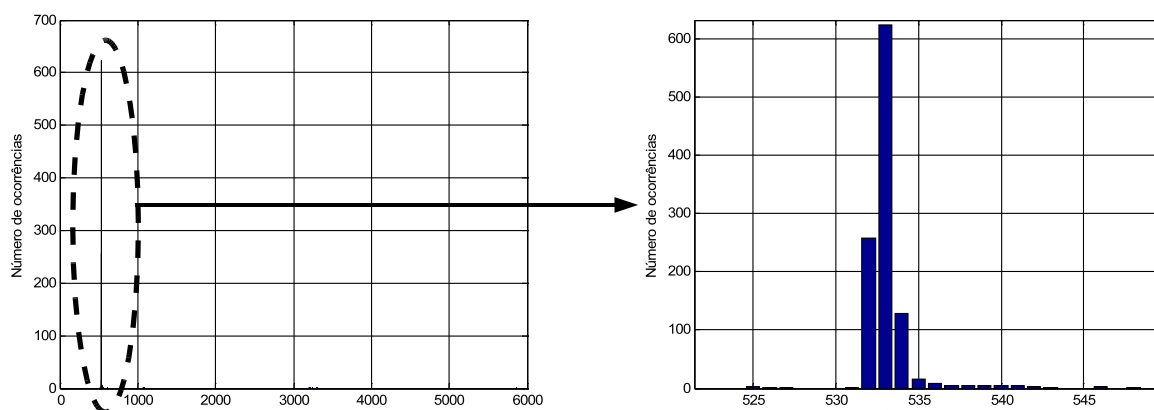


Figura 49: Histograma relativo aos períodos das mensagens DT3

concentração dos valores dos períodos de amostragem da mensagem DT3 se dá no intervalo compreendido entre 525 [ms] e 548 [ms], correspondendo a cerca de 97,98% dos períodos de amostragem verificados. O valor definido pela ferramenta de configuração Syscon foi de 533 [ms]. A Tabela 2 apresenta um resumo estatístico sobre a dispersão de dados analisada.

Tabela 3: Resumo estatístico da monitoração das mensagens DT3

Período [ms]				
Syscon	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
533	5875	525	577,01	353,02

A coluna "Syscon" representa o valor do período de amostragem definido pela ferramenta de configuração Syscon, a coluna "Máximo" representa o máximo período entre duas mensagens DT3 (esta mensagem contém o valor de  $y(t)$  lido pelo transmissor IF302 que é disponibilizado para o transmissor FI302), a coluna "Mínimo" representa o mínimo período entre duas mensagens DT3, a coluna "Média" representa a média aritmética de todos os períodos de amostragem das mensagens DT3 circulantes no barramento e a coluna "Desvio Padrão" representa o desvio padrão de todos os períodos de amostragem (das mensagens DT3) verificados ao longo do experimento em relação à média calculada. É importante frisar que as mensagens DT3 monitoradas neste experimento são as vinculadas à malha de controle do sistema projetado, que representa o foco de nossa análise.

A Figura 50 apresenta a evolução temporal dos períodos de amostragem verificados ao longo do experimento.

Pode-se notar, através da Figura 50, que o período de amostragem definido pela ferramenta de configuração Syscon muitas vezes não é respeitado e, os desvios, embora em sua grande maioria permaneça dentro do intervalo  $T_{SYSCON} \pm 3\%$ , correspondendo a mais de 97,98% dos períodos verificados, existem casos onde o desvio atinge proporções preocupantes chegando a superar, neste caso, mais de 1102% do valor do período estabelecido pela ferramenta de configuração, comprometendo completamente o determinismo temporal exigido pelas aplicações de tempo real críticas.

Outra observação bastante pertinente em relação ao novo sistema projetado é que a ferramenta de configuração Syscon não otimiza o escalonamento das mensagens a fim de se manter o período de amostragem o menor possível, visto que, com a inserção de três

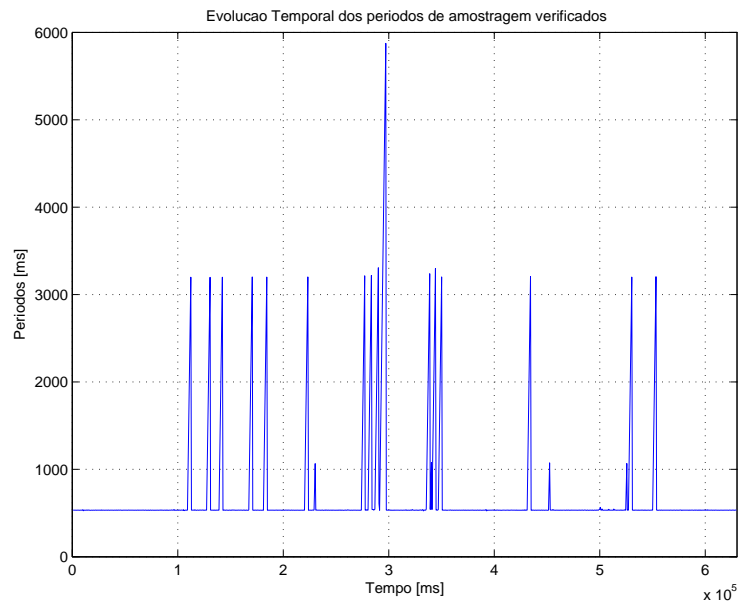


Figura 50: Evolução temporal dos períodos de amostragem da mensagem DT3

novos transmissores e quatro blocos funcionais (um **AI**, um **PID** e dois **AO**) houve um acréscimo no período de amostragem de 85,71% em relação ao período de amostragem do sistema projetado quando este funcionava isoladamente.

A Figura 51 apresenta o diagrama em blocos do primeiro sistema simulado, descrito na seção 4.2.2, onde toda a dinâmica envolvida no sistema é contínua e as métricas de desempenho são definidas na seção 4.2.6.1. O tempo de acomodação  $T_s$  definido pelo modelo adotado é de 5,74 [s] e o sobrepasso  $M_p$  é de 10%.

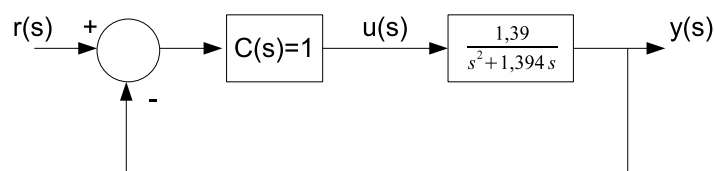


Figura 51: Diagrama em blocos do sistema contínuo usado como referência

Como pode ser observado na Figura 52 o modelo simulado segue perfeitamente as métricas de desempenho definidas na seção 4.2.6.1, apresentando tempo de acomodação de 5,74 [s] e um sobrepasso de 10%. Este modelo será utilizado como referência para a posterior comparação com o sistema de controle realizado pela rede industrial Foundation Fieldbus.

A segunda simulação, representada pelo diagrama em blocos da Figura 53, leva em consideração um sistema de controle amostrado, com período de amostragem igual ao período definido pela ferramenta de configuração Syscon, que atua sobre uma planta com dinâmica contínua. O modelo da planta utilizado na simulação é o mesmo definido para a simulação anterior, sendo  $G(s) = \frac{1,39}{s^2 + 1,394s}$ . A Figura 54 mostra o resultado da simulação do sistema.

Como pode ser evidenciado através da análise da Figura 54, com o aumento do tempo de amostragem em relação ao período de amostragem anterior houve uma degradação ainda maior do desempenho do sistema de controle. Observando-se atentamente a Figura

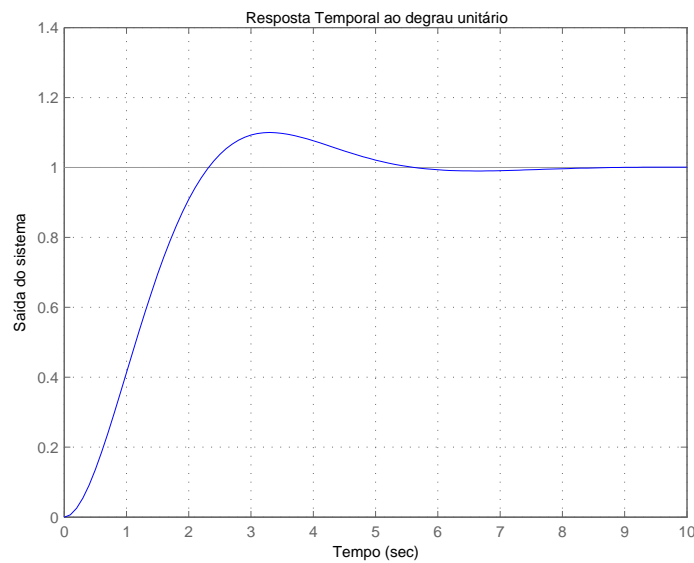


Figura 52: Resposta temporal do sistema ao degrau unitário

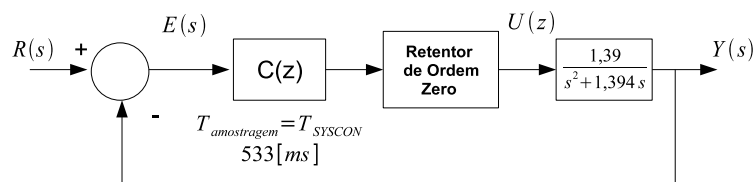


Figura 53: Diagrama em blocos do sistema de controle amostrado e processo contínuo

54, pode ser constatado que o sistema apresenta um aumento no máximo sobrepasso, que passa a ser aproximadamente  $M_p = 23\%$ . Tal máximo sobrepasso apresenta um aumento de 42,68% em relação ao máximo sobrepasso obtido anteriormente onde o tempo de amostragem considerado era de 287 milissegundos. O tempo de acomodação  $T_s$  também sofre um incremento, passando a ser de 7,5 segundos.

O terceiro caso a ser estudado é o sistema contínuo projetado  $G(s)$  sob o controle dos transmissores FI302 e IF302, pertencentes a rede industrial Foundation Fieldbus. A distribuição temporal das mensagens DT3 referentes às informações produzidas na saída do sistema projetado, adquiridas pelo transmissor IF302 e repassadas ao transmissor FI302 para a execução do algoritmo de controle PID é mostrada na Figura 49. A configuração lógica é apresentada pela Figura 40.

A resposta temporal do sistema em questão é apresentada a seguir através da Figura 55. Como pode ser observado o tempo de acomodação do sistema é de aproximadamente 11 segundos e o máximo sobrepasso apresentado pelo mesmo é de 30,20%. Fazendo a apresentação da simulação gerada pelo computador juntamente com a resposta obtida através do ensaio do sistema projetado, pode-se observar na Figura 56, que a diferença entre o máximo sobrepasso do sistema de controle amostrado simulado e o obtido pelo ensaio é de aproximadamente 7% e a variação no tempo de acomodação do mesmo é de aproximadamente 5 segundos.

Uma outra comparação de relevância é o confronto das respostas obtidas nos dois experimentos, para que se possa quantificar qualitativamente o quanto o desempenho do sistema de controle foi afetado pelo aumento das mensagens circulantes no barramento.

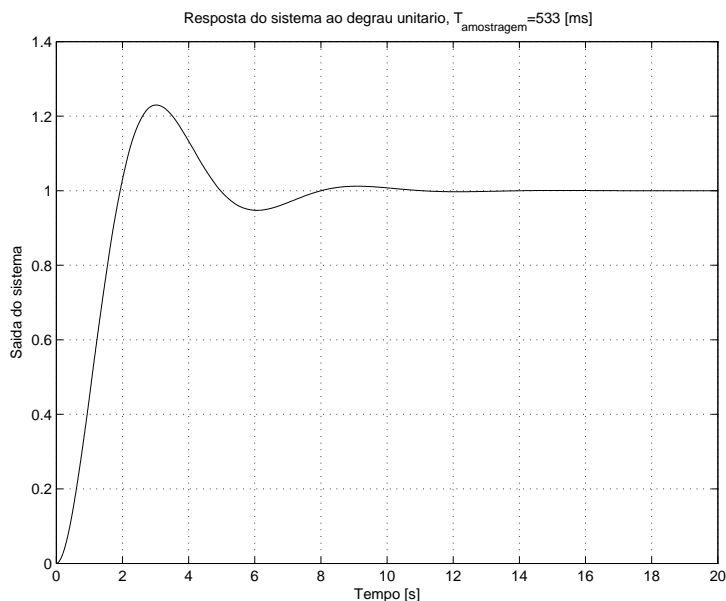


Figura 54: Resposta temporal do sistema de controle amostrado e processo contínuo

Tal comparação pode ser observada através da Figura 57.

Através da análise da Figura 57 pode-se observar que não há o comprometimento do desempenho do sistema de controle devido à alteração do período de amostragem, sendo que a dinâmica do sistema sofreu apenas uma pequena alteração. Vale lembrar que o tempo de amostragem do sistema no Experimento I era de 287 [ms] e o mesmo tempo de amostragem no Experimento II foi de 533 [ms] o que representa um acréscimo de 85,71% do tempo de amostragem definido no Experimento I. Comparando-se os parâmetros de desempenho do sistema de controle do Experimento I com os parâmetros de desempenho obtidos no Experimento II pode-se observar que no Experimento I o máximo sobrepasso foi de 26,20% ao passo que no Experimento II foi observado um máximo sobrepasso de 30,60% e ambos tempos de acomodação permaneceram em torno de 11 segundos. Devido a natureza dos processos industriais ser, em sua grande maioria, muito mais lenta do que a dinâmica dos sensores e atuadores envolvidos no sistema de controle, ocorre que as variações existentes nos tempos de amostragem de sensoriamento e atuação não interferem de forma incisiva no desempenho do sistema de controle.

Será apresentado, através da Tabela 4, os parâmetros de desempenho obtidos através da simulação do sistema analógico, do sistema de controle discreto juntamente com a planta contínua e do ensaio representado pelos experimentos I e II.

Tabela 4: Parâmetros de desempenho dos sistemas apresentados

Descrição	$M_p$	$T_s$
Sistema de controle contínuo	10%	5,74 [s]
Simulação de sistema de controle amostrado [287 ms]	16,12%	6,9 [s]
Simulação de sistema de controle amostrado [533 ms]	23,00%	7,5 [s]
Experimento I [ $T_{amostragem} = 287ms$ ]	26,20%	11 [s]
Experimento II [ $T_{amostragem} = 533ms$ ]	30,20%	11 [s]

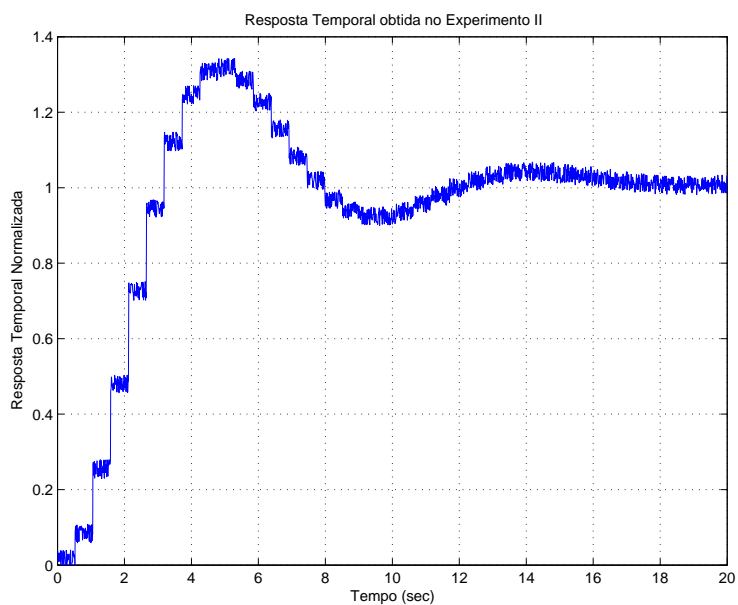


Figura 55: Resposta temporal do sistema projetado

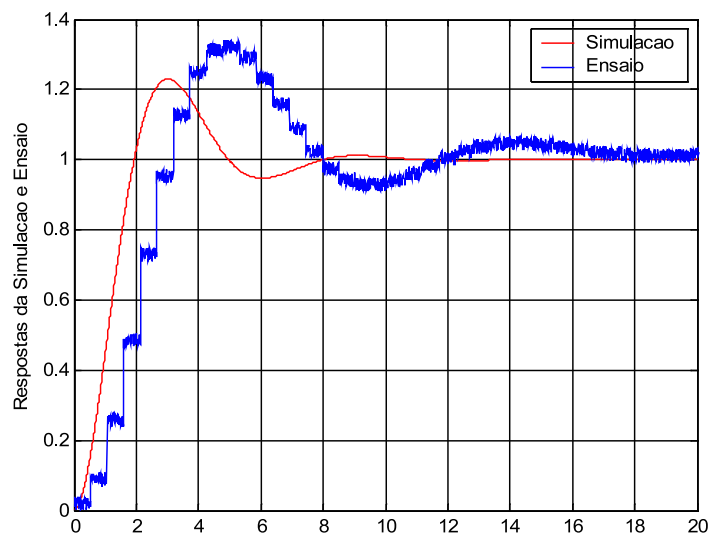


Figura 56: Comparação entre a resposta temporal do sistema projetado e da simulação do sistema de controle amostrado e planta contínua

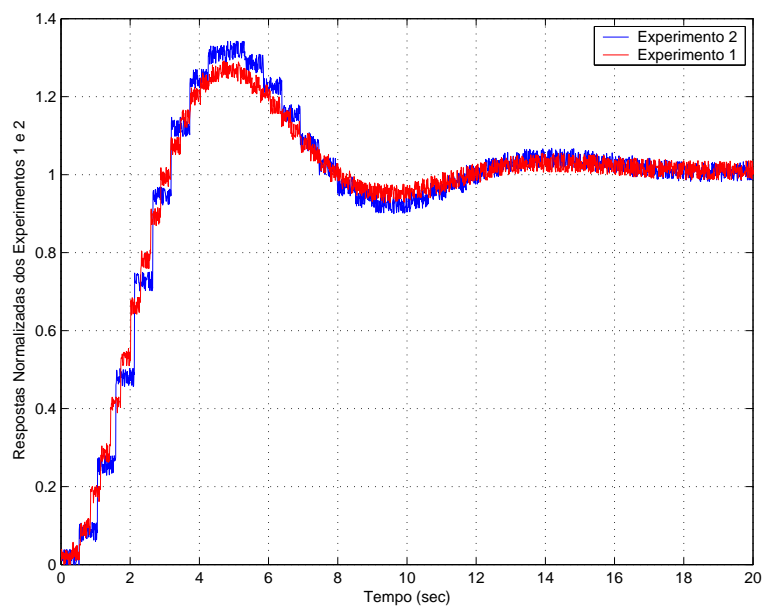


Figura 57: Comparação entre a resposta temporal do sistema projetado através do experimento 1 e experimento 2

## 6 CONCLUSÃO

Os sistemas de controle industrial vêm nas últimas décadas evoluindo em um ritmo bastante acentuado, pode-se citar como exemplo dessa evolução as arquiteturas de controle utilizadas nas mais diversas aplicações industriais de controle e automação. Uma das vertentes dos sistemas de controle atuais são os sistemas de controle distribuídos em rede e, dentre estes, um que tem ganhado bastante destaque devido as mais diversificadas aplicações industriais é o protocolo Foundation Fieldbus, que atualmente vem sendo utilizado em soluções de sistemas de controle em aplicações das indústrias químicas, petroquímicas, celulose e papel, tratamento de efluentes e em usinas de açúcar e álcool.

A evolução trazida pelo avanço da microeletrônica possibilitou que o poder de processamento fosse levado para os diversos dispositivos utilizados no sistema de controle, sendo assim, o algoritmo e a lógica de controle puderam ser distribuídos entre os diversos componentes do sistema. O problema trazido por esse compartilhamento de processamento é que o sistema de controle passou a trabalhar em rede e a inserção desta rede na malha de controle tende a influenciar o comportamento e desempenho do sistema em questão. As principais influências causadas pela inserção da rede foram investigadas e apresentadas no capítulo 3, sendo abordadas as questões do atraso de transporte gerado pela comunicação em rede e seu impacto nos parâmetros de desempenho do sistema, assim como em parâmetros relacionados à estabilidade do sistema de controle como a margem de ganho e a margem de fase do sistema. Outra questão abordada em relação a inserção da rede de comunicação na malha de controle diz respeito ao tipo de rede utilizado no sistema, visto que dependendo das características da rede utilizada, ter-se-á atrasos com diferentes comportamentos temporais e que devem ser tratados no sistema de controle de acordo com essas características peculiares. Um tópico em constante estudo é investigado na seção 3.1.6 onde novas metodologias em sistemas de controle em rede foram apresentadas, assim como foi abordado posteriormente o escalonamento de mensagens.

Um outro aspecto investigado foi a influência da escolha do tempo de amostragem do sistema de controle, visto que a qualidade do desempenho do sistema de controle em questão cai consideravelmente com o aumento do tempo de amostragem. Uma observação bastante pertinente em relação à escolha do tempo de amostragem é que algumas regras práticas utilizadas para a escolha do tempo de amostragem do sistema de controle são bastante conservativas, o que em muitos casos, dificulta o desenvolvimento do sistema de controle além de superdimensionar desnecessariamente o mesmo.

A análise teórica mostrou que um aumento no tempo de amostragem pode levar a um aumento no máximo sobrepasso e no tempo de acomodação do sistema. A análise experimental comprovou o impacto da variação do tempo de amostragem estudado na análise teórica, permitindo ainda, observar a influência da adição de uma malha de controle a um

sistema com uma malha, ocasionando:

- Aumento do tempo de amostragem em função do aumento do macrociclo definido pela ferramenta de configuração Syscon.
- Aumento da variação do tempo de amostragem, visto que para o macrociclo definido em 287 [ms], correspondente a malha única de controle, a máxima variação do período de amostragem foi de 92,68% ao passo que a variação do tempo de amostragem do sistema de controle projetado em funcionamento conjunto com a malha monovariável de controle de nível, onde o macrociclo definido foi de 533 [ms], a máxima variação verificada foi de 1002,25%.

Uma constatação relevante foi a influência da questão da precedência no sistema de controle, visto que, não se considerando a precedência para a execução do algoritmo de controle há um impacto direto no desempenho do sistema de controle, sendo este influenciado mais pela questão da precedência do que pela própria variação do tempo de amostragem.

Vale lembrar que as dinâmicas temporais dos sistemas e processos industriais, em sua grande maioria, são bastante lentas quando comparadas as dinâmicas temporais dos sensores, controladores e atuadores utilizados no desenvolvimento do sistema de controle e, sendo assim, eventuais atrasos e variações nos tempos de amostragem e atuação do sistema de controle não apresentam impacto incisivo no desempenho do sistema de controle.

Futuros trabalhos na área de sistemas de controle em rede podem ser desenvolvidos visando uma gama bastante abrangente de assuntos, podendo ser explorados tópicos como a análise de estabilidade de sistemas de controle em rede, estratégias de controle em rede, identificação de problemas de controle em rede em aplicações industriais, assim como o desenvolvimento de algoritmos de escalonamento de mensagens visando o melhor dimensionamento temporal da ocupação do barramento e da comunicação em si.



## 7 ANEXOS

Nas páginas seguintes serão apresentados os softwares desenvolvidos para simulação dos diversos sistemas utilizados neste trabalho, assim como, os esquemáticos e curvas de resposta dos condicionadores de sinais utilizados no sistema projetado para a realização dos ensaios experimentais.

O programa a seguir foi desenvolvido no software Matlab 6.5 e simula a resposta de um sistema de 2ª ordem, apresentando como resultado um gráfico com a resposta temporal do sistema.

---

```

% Simulacao de um sistema de 2a ordem
% Limpa Variaveis
clear all;

% Limpa Tela
clc;

% Tempo de acomodacao [s]
Ts = 3;

% Overshoot
Mp = .15;

% Parametros do modelo de 2a ordem  $y(s)/r(s) = wn^2/(s^2 + 2.qsi.wn.s + wn^2)$ 
[qsi, wn] = param_qsi_wn(Mp, Ts);

% Definicao do sinal de referencia
r = 1.0;

% Definição do incremento temporal [s]
dt = 0.001;

% Horizonte de simulacao
n = 1e4;

% Inicializacao das variaveis
d2y_old = 0.0;
dy = 0.0;
dy_old = 0.0;

```

```

y = 0.0;
Id2y = 0.0;
Idy = 0.0;
y_old = 0.0;

    % Loop de Controle
for k = 1 : n
d2y = wn * wn * r - 2 * qsi * wn * dy - wn * wn * y;
Id2y = (d2y + d2y_old) * dt / 2 + Id2y;
dy = Id2y;
Idy = (dy + dy_old) * dt / 2 + Idy;
y = Idy;
y_out(k) = y;
t_out(k) = k * dt;
dy_old = dy;
d2y_old = d2y;
end
plot(t_out,y_out,'red');
grid;

```

---

O segundo programa apresentado abaixo também foi desenvolvido no software Matlab 6.5 e é na verdade uma função (`param_qsi_wn`) chamada no programa previamente apresentado, sendo responsável por retornar os valores da frequência de oscilação natural do sistema  $w_n$  e da constante de amortecimento  $\xi$ .

---

```

%Mp=overshoot
%Ts=Tempo de acomodacao
function[qsi,wn] = param(Mp,Ts);
qsi = sqrt((log(Mp)^2)/(pi^2 + log(Mp)^2));
wn = 4/(qsi * Ts);

```

---

O software a seguir simula o comportamento temporal de um sistema de 2ª ordem sob a influência da variação do tempo de amostragem da variável controlada. Como resultado, este software gera os gráficos da resposta temporal do sistema e dos períodos de amostragem do mesmo.

---

```

% Simulacao de um sistema de 2a ordem
% Limpa variaveis
clearall;

    % Limpa Tela
clc;

    % Tempo de acomodacao [s]
Ts = 5.0;

```

```

% Overshoot
Mp = .1;

% Período de amostragem da saída [s]
T_amostr = 0.275;

% Parâmetros do modelo de 2ª ordem  $y(s)/r(s) = \frac{wn^2}{(s^2 + 2 \cdot qsi \cdot wn \cdot s + wn^2)}$  [qsi, wn] =
param_qsi_wn(Mp, Ts);

% Definição do sinal de referência
r = 1.0;

% Definição do incremento temporal [s]
dt = 0.001;

% Horizonte de simulação
n = 1e4;

% Inicialização das variáveis
d2y_old = 0.0;
dy = 0.0;
dy_old = 0.0;
y = 0.0;
Id2y = 0.0;
Idy = 0.0;
y_old = 0.0;
tempo_total_amostrado = 0.0;

% Loop de Controle
fork = 0 : n
d2y = wn * wn * r - 2 * qsi * wn * dy - wn * wn * y;
Id2y = (d2y + d2y_old) * dt / 2 + Id2y;
dy = Id2y;
Idy = (dy + dy_old) * dt / 2 + Idy;
if(abs((k * dt) - tempo_total_amostrado) <= 0.002)
y = Idy;
if(T_amostr > 0.275)
T_amostr = T_amostr - 0.002 * rand;
else
T_amostr = T_amostr + 0.002 * rand;
end
tempo_total_amostrado = tempo_total_amostrado + T_amostr;
end
y_cont(k + 1) = Idy;
y_out(k + 1) = y;
t_out(k + 1) = k * dt;
dy_old = dy;
d2y_old = d2y;

```

```

T(k + 1) = T_amostr;
end
plot(t_out,y_cont,'b');
grid;
figure(2);
plot(t_out,T);
grid;

```

---

O próximo programa também foi desenvolvido no software Matlab 6.5 e tem por finalidade apresentar a simulação de um sistema de 2ª ordem sob a influência da variação dos tempos de amostragem tanto da variável manipulada quanto da variável controlada. Vale observar que o trecho de código limitado por uma linha tracejada tem por objetivo acionar o controlador somente depois de recebida a informação do sensor responsável pela aquisição da variável manipulada (acionado por evento).

---

```

% Simulacao de um sistema de 2a ordem
% Limpa variaveis
clear all;

% Limpa Tela
clc;

% Tempo de acomodacao [s]
Ts = 5.74;

% Overshoot
Mp = .1;

% Periodo de amostragem da saida [s]
T_amostr = 0.287;

% Periodo de amostragem do controle [s]
T_amostr_cont = 0.287;

% Parametros do modelo de 2a ordem  $y(s)/r(s) = wn^2/(s^2 + 2.qsi.wn.s + wn^2)$ 
[qsi, wn] = param_qsi_wn(Mp, Ts);

% Definicao do sinal de referencia
r = 1.0;

% Definicao do incremento temporal [s]
dt = 0.001;

% Horizonte de simulacao
n = 14484;

f = 1;

```

```

figure(1);
title('Resposta Temporal do Sistema Continuo com Saida e Controle Amostrados');
hold;
while(f<1000)

    %Inicializacao das variaveis
    d2y_old = 0.0;
    dy = 0.0;
    dy_old = 0.0;
    y = 0.0;
    Id2y = 0.0;
    Idy = 0.0;
    y_old = 0.0;
    tempo_total_amostrado = 0.0;
    tempo_total_amostra_controle = 0.0;
    n_cont = 1;
    flag = 1;
    T_cont_old = 0.0;

    % Loop de Controle
    for k = 0 : n
        if (abs((k*dt)-tempo_total_amostra_controle) <= 0.002) % Controlador discreto
            C = wn * wn * r - wn * wn * y;
            control_signal(n_cont) = C;
            t_cont(n_cont) = tempo_total_amostra_controle;
            n_cont = n_cont + 1;
            if (T_amostr_cont > 0.287)
                T_amostr_cont = T_amostr_cont - 0.01 * rand;
            else
                T_amostr_cont = T_amostr_cont + 0.01 * rand;
            end
            tempo_total_amostra_controle = tempo_total_amostra_controle + T_amostr_cont;
        end
        %-----
        %if (flag == 1) % Controlador acionado por eventos
        % C = wn * wn * r - wn * wn * y;
        % control_signal(n_cont) = C;
        % t_cont(n_cont) = k * dt;
        % n_cont = n_cont + 1;
        % T_amostr_cont = k * dt - T_cont_old;
        % T_cont_old = k * dt;
        % if(T_amostr_cont < 0.010)
        % T_amostr_cont = 0.275;
        % end
        % flag = 0;
        %end
        %-----
        d2y = C - 2 * qsi * wn * dy;
    end
end

```

```

Id2y = (d2y + d2y_old) * dt / 2 + Id2y;
dy = Id2y;
Idy = (dy + dy_old) * dt / 2 + Idy;
if (abs((k*dt)-tempo_total_amostrado) <= 0.002)
y = Idy;
if (T_amost > 0.287)
T_amost = T_amost - 0.27 * rand;
else
T_amost = T_amost + 0.27 * rand;
end
tempo_total_amostrado = tempo_total_amostrado + T_amost;
% flag = 1; % Flag utilizado no acionamento do controlador
end
y_cont(k + 1) = Idy;
y_out(k + 1) = y;
t_out(k + 1) = k * dt;
dy_old = dy;
d2y_old = d2y;
T(k + 1) = T_amost; % Período de amostragem da saída
T_cont(k + 1) = T_amost_cont;
end
% figure(1);
plot(t_out,y_cont,'-');
grid;
figure(2);
plot(t_out,T);
title('Comportamento Temporal do Período de Amostragem da Saída do Sistema');
grid;
figure(3);
plot(t_out,T_cont);
title('Comportamento Temporal do Período de Amostragem do Sistema de Controle');
grid;
figure(4);
plot(t_cont,control_signal);
title('Sinal de Controle Amostrado');
grid;
f=f+1;
end

```

---

A curva apresentada a seguir foi obtida através de um ensaio para que fosse realizada a aferição dos transmissores utilizados e a determinação das melhores equações que representassem o real funcionamento do sistema.

### Curva característica do Conversor Tensão-Corrente (IF302)

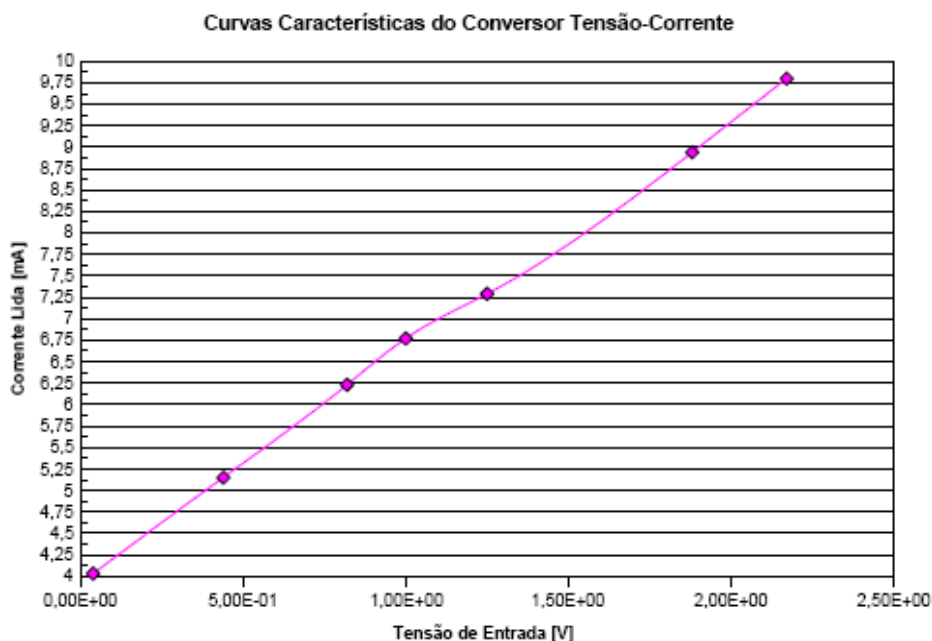


Figura 58: Corrente lida em função da tensão de entrada aplicada

Através do uso da regressão linear foi determinada a melhor equação de reta descrita pelos pontos obtidos através do ensaio realizado. A equação é apresentada a seguir.

$$i_{IF302} = 2,6737 \cdot V_{y(t)} + 3,9843$$

O próximo gráfico apresentado está relacionado com o condicionador de sinal que transforma o sinal de corrente gerado pelo transmissor FI302 em um sinal de tensão condizente com o sistema projetado. Primeiramente o sinal de corrente é convertido em um sinal de tensão de 2 à 10 V e logo após é novamente convertido para uma faixa de tensão de 4 à -12V (devido ao fato de serem usados somente amplificadores inversores esta faixa de tensão foi invertida).

Utilizando o mesmo conceito de regressão linear foram determinadas as equações das duas retas envolvidas nas duas etapas da conversão.

Tensão gerada pela fonte de tensão controlada por corrente (Etapa I - curva em vermelho)

$$V_1 = 0,9993 \cdot i_{FI302} + 0,1162$$

Tensão usada na realimentação do sistema (Etapa II - curva em amarelo)

$$V_{REALIMENTACAO} = -2,0098 \cdot i_{FI302} + 7,7529$$

A relação entre  $i_{IF302}$  e  $i_{FI302}$  pode ser estabelecida através das seguintes relações:

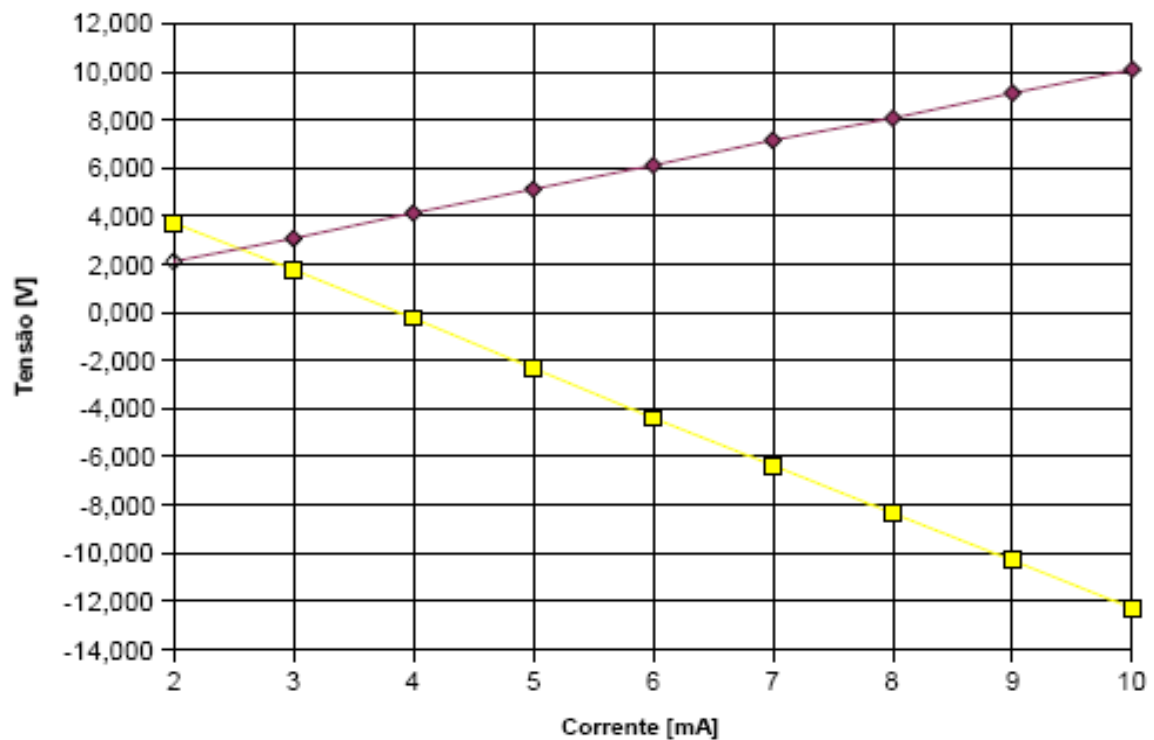


Figura 59: Tensão em função da corrente gerada pelo transmissor FI302

$$V_{REALIMENTACAO} = 5,0872 \cdot [V_{y(t)}(i_{REF}) - V_{y(t)}(i_{PV})]$$

$$V_{REALIMENTACAO} = 5,0872 \cdot \left( \frac{i_{IF302}^{REF} - 3,9843}{2,6737} - \frac{i_{IF302}^{PV} - 3,9843}{2,6737} \right)$$

$$1,90261 \cdot (i_{IF302}^{REF} - i_{IF302}^{PV}) = 2,0098 \cdot i_{FI302} + 7,7529$$

$$i_{FI302} = 0,9467 \cdot (i_{IF302}^{REF} - i_{IF302}^{PV}) + 3,8575$$





## REFERÊNCIAS

ABENI, L.; BUTTAZZO, G. Integrating multimedia applications in hard real time systems. In: IEEE REAL TIME SYSTEMS SYMPOSIUM, 1998, Madrid. **Proceedings...** New York: IEEE, 1998. p. 4-13.

ABDELZAHER, T. F.; ATKINS, E. M.; SHIN, K. G. QoS negotiation in real-time systems and its application to automated flight control . **IEEE Transactions on Computers**, New York , v. 49, n. 11, p. 1170-1183, 2000.

ALDARMI, S. A.; BURNS, A. A Dynamic value-density for scheduling real time systems. In: EUROMICRO CONFERENCE ON REAL TIME SYSTEMS, 1999, York, England. **Proceedings...**, Los Alamitos, Califórnia, USA: IEEE, 1999. p. 270.

ALMEIDA, L.; PEDREIRAS, J. F. FTT-CAN:Why and How. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 49, n. 6, p. 1189-1201, Dec. 2002.

ALMUTAIRI, N. B.; CHOW, M. Y.; TIPSUWAN, Y. Networkbased controlled DCmotor with fuzzy compensation.In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 27., 2001, Denver. **Proceedings...** Los Alamitos, Califórnia, USA: IEEE, v. 3, p. 1844-1849, 2001.

ASTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer-Controlled Systems: theory and design**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1996. 555 p. ISBN-100133148998.

AUDSLEY, N.; TINDELL, K.; BURNS, A. The end of the line for static cyclic scheduling. In: EUROMICRO WORKSHOP ON REALTIME SYSTEMS, 1993, **Proceedings...** Los Alamitos, Califórnia, USA: IEEE, 1993. p. 36-41.

BARUAH, S.; CHEN, D.; MOK, A. Static priority scheduling of multiframe tasks. In: EUROMICRO CONFERENCE ON REALTIME SYSTEMS, 1999, **Proceedings...** Los Alamitos, Califórnia, USA: IEEE, 1999. p. 38.

BARUAH, S.; GOOSSENS, J.; FUNK, S. Robustness results concerning EDF scheduling upon uniform multiprocessors. **IEEE Transactions on Computers**. New York, v. 52, n. 9, p. 1185-1195, 2003.

BARUAH, S.; GOOSSENS, J. Scheduling real-time tasks: algorithms and complexity. In: LEUNG, Joseph Y. T. (ed.) **Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis**. London: Chapman Hall/CRC Press, 2004.

BIONDO, P. A.; FAYAD, C. A., Reliability with foundation fieldbus. NETWORKING AND COMMUNICATIONS ON THE PLANT FLOOR -ISA TECH, 1999. **Proceedings...** North Carolina: ISA, 1999. v. 392, p. 229-245.

BURNS, A.; WELLINGS, A. **Real-Time Systems and Programming Languages - Ada 95**: real-time java and real-time POSIX. Mexico: Addison Wesley Longmain, 2001. 611 p. ISBN: 0201729881.

CHAN, H., ÖZGÜNER, U. Closed-loop control of systems over a communications network with queues. **International Journal of Control**, London, v. 62, p. 493-510, 1995.

DRAPER, D. L. et al. Cyclic scheduling. In: **International Joint Conference On Artificial Intelligence**. San Francisco CA:Morgan Kaufmann Publishers Inc.,1999. p. 1016-1021.

FARINES, J.M.; FRAGA, J. S.; OLIVEIRA, R. S. **Sistemas de Tempo Real**. 2000. 193 p. Disponível em: <<http://http://www.das.ufsc.br/gtr/livro/principal.htm>>. Acesso em: 17 agosto 2006.

FILIPIAK, J. **Modelling and Control of Dynamic Flows in Communication Networks**. Berlin: Springer-Verlag, 1988.

FRANCO, L. R. H. R. **Escalonamento de Mensagens para a Comunicação no Fieldbus**. 1998. 124 fls. Tese (Doutorado em engenharia), Escola Politécnica - USP, São Paulo, 1998.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D. **Feedback Control of Dynamic Systems**, 4. Ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2002. 910 p. ISBN-10: 0130323934

GÖKTAS, F. **Distributed Control of Systems Over Communication Networks**. 2000. Tese (Doutorado), University of Pennsylvania, Pennsylvania, 2000.

GOMES DA SILVA JR., J. M.; BAZANELLA, A. S. **Sistemas de Controle**: princípios e métodos de projeto. Porto Alegre: UFRGS, 2006. 302 p. ISBN: 8570258496

GOOSSENS, J. Worst case response time versus worst case offset configuration using the deadline driven scheduler. In: CONFERENCE OF REAL TIME SYSTEMS, 2001, Paris, France. **Proceedings...**, Paris: [s.n.], 2001.

GOOSSENS, J.; RICHARD, P. Overview of real-time scheduling problems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROJECT MANAGEMENT AND SCHEDULING, 9., Apr. 2004, Nancy, France. **Proceedings...** Nancy: [s.n.], 2004, p. 13-22.

GUTIERREZ, J.; HARBOUR, M. Schedulability analysis for tasks with static and dynamic offsets. In: IEEE REALTIME SYSTEMS SYMPOSIUM, 1998, **Proceedings...**, New York: IEEE, 1998. p. 26.

HALEVI, Y.; RAY, A. Integrated communication and control systems: part I- analysis. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, New York, v. 110, p. 367-373, 1988.

HARBOUR, M. G.; KLEIN, M. H.; LEHOCZKY, J. P. Timing analysis for fixed priority scheduling of hard realtime systems. **IEEE Transactions on Software Engineering**, New York: v. 20, n. 1, p. 13-28. 1994.

HENRIQUES, A. M. **Escalonamento no Fieldbus**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HONG, S. H., KIM, W.H. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol. In: PROCEEDINGS IEEE. **Control Theory And Applications**. New York: IEEE, v. 147, n. 1, p. 37-44, 2000.

JOSEPH, M.; PANDYA, P. Finding response times in a realtime system. **The Computer Journal**, Cambridge, v. 29, n. 5, p. 390-395. 1986.

KIM, Y.H.; PARK, H.S.; KWON, W.H. Stability and a scheduling method for network-based control systems. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 96), 1996, Taipei, Taiwan. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, v.2, p. 934-939,1996.

KIM, Y.H.; PARK, H.S.; KWON, W.H. A scheduling method for networkbased control systems.In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE,1998, Philadelphia. **Proceedings...** [S.l.], v. 2, p. 718-722. 1998.

KLEIN, M. H. et al. **A Practitioner's Handbook for RealTime Analysis**. Norwell, MA: Kluwer Academic Publisher. 1993. 466 p. ISBN:0-7923-9361-9.

KUO, B. C. **Automatic Control Systems**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. 624 p. ISBN : 0471134767.

LEHOCZKY, J.; SHA, L.; STROSNIDER, J. Enhanced aperiodic responsiveness in hard realtime environment. In: IEEE REAL TIME SYSTEMS SYMPOSIUM,1987. **Proceedings...** New York: IEEE, 1987. p. 261-270.

LEUNG, J. Y. T.; WHITEHEAD, J. On the complexity of fixed priority scheduling of periodic, realtime tasks. **Real Time Systems Journal**, v. 2, n. 4, p. 237-250, 1982.

LI, B.; NAHRSTEDT, K. A Control-based middleware framework for quality-ofservice adaptations. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, New York, v.17, n.9, p. 1632-1650, 1999.

LIAN, F. L.; MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M. Performance evaluation of control networks: ethernet, controlNet and deviceNet. **IEEE Control System Magazine**, New York, v. 21, n. 1, p. 66-83, 2001.

LIU, L.W.; RAY, A. Integrated communication and control systems: Part III-nonidentical sensor and controller sampling. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, New York, v. 112, p. 357-364, 1990.

LIU, C. L.; LAYLAND, J. W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard realtime environment. **Journal of the Association for computing machinery**, New York, v. 20, n.1, p. 40-61, jan. 1973.

LOCKE, C. D., Software architecture for hard realtime applications: Cyclic vs. fixed priority executives. **Real Time Systems Journal**, Holanda, v. 4, n. 1, p. 37-53.

LUCK, R.; RAY, A. An observer-based compensator for distributed delays. **Automatica**, Oxford, v. 26, n. 5, p. 903-908, 1990.

LUCK, R.; RAY, A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems. **International Journal of Control**, London, v. 59, p. 1357-1372, 1994.

MERCER, C.W. **An Introduction to Real-Time Operating Systems: scheduling theory**. 1992. 67 p. Disponível em <[http://www-md.e-technik.uni-rostock.de/ma/gol/rtsys/articulos/surl\\_review.pdf](http://www-md.e-technik.uni-rostock.de/ma/gol/rtsys/articulos/surl_review.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2006.

NILSSON, J. **Real-Time Control Systems with Delays**. 1998. 141 fls. Tese (Doutorado em Engenharia), Dept. Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Suécia, Janeiro de 1998.

PINEDO, M. **Scheduling - Theory, Algorithms and Systems**. Englewood Cliffs: Prentice- Hall, 1995. 600 p. ISBN-10: 0137067577.

REDELL, O.; TÖRNGREN, M. Calculating exact worstcase reponse times for static priority scheduled tasks with offsets and jitter. In: IEEE REALTIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SYMPOSIUM, 2002. **Proceedings...** New York: IEEE 2002. p. 164-172.

REDELL, O.; SANFRIDSON, M. Exact best case response time analysis of fixed priority scheduled tasks. In: EUROMICRO CONFERENCE ON REALTIME SYSTEMS, 14., 2002, Viena. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2002. p. 165-172.

REIGH, J. A.; SWAIM, W. H.; YANGULA, B. P. Fieldbus in the process control laboratory: it's time has come. In: ASEE/IEEE FRONTIERS IN EDUCATION CONFERENCE, 1999, San Juan, Puerto Rico. **Proceedings...** New York: IEEE, 1999. v. 3, p. 13B4/12-13B4/17.

SMAR, EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. **Fieldbus Universal Bridge - DFI302: manual do usuário**. 2005. 220 p. Disponível em: <<http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302MP.PDF>>. Acesso em 17 novembro 2005.

SMAR, EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. **Fieldbus Tutorial: a foundation fieldbus technology overview**. 2004. 29 p. Disponível em: <<http://www.smar.com/PDFs/Catalogues/FBTUTCE.pdf>>. Acesso em: 15 agosto 2005.

SPRUNT, B.; SHA, L.; LEHOCZKY, J. Aperiodic task scheduling for hard-real-time systems. **The International Journal of Time-Critical Computing Systems**, Boston, v. 1, p. 27-60, 1989.

SPURI, M.; BUTTAZZO, G. Scheduling aperiodic tasks in dynamic priority systems. **Real Time Systems Journal**, Holanda, v.10, n.2, p. 179-210, 1996.

STANKOVIC, J. A.; SPURI, M.; RAMAMRITHAM, K. **Deadline Scheduling for RealTime Systems: EDF and related algorithms**. Berlin: Springer, 2005. 296 p. ISBN-10: 0792382692.

TARN, T. J.; XI, N. Planning and control of internet-based teleoperation. In: **TELEMANNIPULATOR AND TELEPRESENCE TECHNOLOGIES 5.**, Boston, **Proceedings ...** Boston: SPIE, v. 3524, p. 189-193, 1998.

THOMESSE, J. P. A Review of the fieldbuses. **Annual Reviews in Control**, Oxford, v. 22, p. 35-45, 1998.

TIPSUWAN, Y.; CHOW, M. Y. Fuzzy logic microcontroller implementation for DC motor speed control. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 99), 1999, San Jose, CA. **Proceedings...** New York: IEEE, v. 3, p. 1271-1276.

TIPSUWAN, Y.; CHOW, M. Y. Network-based controller adaptation based on QoS negotiation and deterioration. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 01), 27., 2001, Denver. **Proceedings...** New York: IEEE, v. 3, p. 1794-1799, 2001.

TIPSUWAN, Y.; CHOW, M. Y. Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 02), 2002, Sevilha, Spain. **Proceedings...** New York: IEEE, 2002. v. 4, p. 3146-3151.

(TIPSUWAN, 2003) TIPSUWAN, Y.; CHOW, M. Y. Control methodologies in networked control systems. **Control Engineering Practice**, [S.l.], v. 11, n. 10, p. 1099-1111, fev. 2003.

WALSH, G. C.; YE, H.; BUSHNELL, L. Stability analysis of networked control systems. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1999, San Diego. **Proceedings...** USA: IFAC, v. 4, p. 2876- 2880, 1999.

WALSH, G. C.; YE, HONG; BUSHNELL, L. G. Stability analysis of networked control systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Piscataway, v. 10, n. 3, maio de 2002.

XU, J.; PARNAS, D. L. On satisfying timing constraints in hard-realtime systems. **IEEE Transactions on Software Engineering**, New York, v. 19, n.1, p. 70-84, jan. de 1993.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernatics**, New York, v. 3, n. 1, p. 28-44, jan. 1973.

ZHANG, W.; BRANICKY, M. S.; PHILLIPS, S. M. Stability of networked control systems: explicit analysis of delay. IN: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2000, Chicago. **Proceedings...** USA: IFAC, p. 2352-2357, 2000.